

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2011

Martin Koutný

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**SPOUŠTĚNÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ
POMOCÍ SOFTSTARTÉRU**

**STARTING ASYNCHRONOUS MOTORS BY
HELP OF SOFTSTARTER**

2011

Martin Koutný

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Koutný

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Spouštění asynchronních elektromotorů pomocí softstartéru
Starting Asynchronous Motors by Help of Softstarter

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor spouštění trojfázových elektromotorů sníženým napětím.
2. Proved'te měření asynchronního elektromotoru pro stanovení prvků náhradního schematu.
3. Proved'te měření asynchronního elektromotoru při napájení sníženým napětím z regulačního transformátoru a ze softstartéru.
4. Porovnejte výsledky měření s teoretickými výpočty.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Bašta, J., Kulda, V., Pavlásek, F. a kol.: Měření na indukčních strojích, Praha, SNTL 1962
2. Chmelík, K.: Asynchronní a synchronní elektrické stroje, skripta VŠB-TU Ostrava, 2002
3. Michalec, J., Peřina, J.: Elektrické stroje I, skripta ČVUT Praha, 1989

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Datum odevzdání práce.....

Podpis.....

Poděkování

Těmito slovy děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Čechovi, Ph.d., dále pak Václavu Kadlecovi a Václavu Kaprálovi, za asistenci při laboratorních měřeních.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá objasněním problematiky spouštění trojfázových asynchronních motorů pomocí softstartéru. Dále uvádí výhody a nevýhody různých spouštěcích metod využívajících snižování napětí pro rozběh asynchronních motorů. Spouštění motorů softstartérem je rozebráno podrobněji.

Další část se zabývá laboratorním měřením na motoru firmy Siemens, které má za cíl určit potřebné parametry motoru, pro výpočet prvků náhradního schématu. K získání záznamů časových průběhů proudů (napětí) při spouštění asynchronního motoru softstartérem, jsem využil bateriový mini-osciloskop Fluke. Pro měření na asynchronním motoru napájeném sníženým napětím z regulačního autotransformátoru, byla k dispozici měřicí soustava zakončená programem virtuálního prostředí LabVIEW. Tento program umožňuje zaznamenat veškeré hodnoty veličin, potřebných k vykreslení příslušných charakteristik.

Porovnáním proudových poměrů při spouštění z autotransformátoru a ze softstartéru, jsem posoudil výhody a nevýhody spouštění motorů softstartérem. Vyhodnocení výsledků je uvedeno v závěru práce.

Abstract

This thesis deals with the issue of clarifying the starting three-phase asynchronous motor with softstarter. It further states the advantages/disadvantages of different methods using the voltage reduction for starting asynchronous motors. Starting motor with softstarter is analyzed in detail.

Following section deals with laboratory measurements on an engine company Siemens, which aims to identify the necessary parameters of the engine, to calculate the substitute scheme. To obtain records of graph current (voltage) while starting an asynchronous motor with softstarter, I used a mini-battery oscilloscope Fluke. To measure the asynchronous motor supplied from a reduced voltage of autotransformer, was available measure system ended with a virtual system environment of LabVIEW program. This program allows you to record all the values of quantities needed to render the particular characters.

Comparing of the current ratios while starting with autotransformer and with softstarter, I have examined the advantages/disadvantages of starting motor with softstarter. Evaluation of results is stated in the conclusion.

Klíčová slova

Softstartér; asynchronní motor; náhradní schéma; měření; metody snížení napětí

Key Words

Softstarter; asynchronous motor; equivalent circuit diagram; measuring; methods for reduction electricvoltage

Seznam použitých symbolů a zkratek

AM	Asynchronní motor	U_s	Napětí sdružené
NS	Náhradní schéma AM	U_s	Napětí sdružené
RAT	Regulační autotransformátor	U_f	Napětí fázové
THD	Činitel harmonického zkreslení	U_n	Jmenovité napětí
C_1	Hopkinsonův činitel rozptylu	U_1	Napětí statoru
ΔP_0	Ztráty naprázdno	U_{10n}	Jmenovité napětí naprázdno
ΔP_{10n}	Jmenovité ztráty naprázdno	U_{1kn}	Jmenovité napětí nakrátko
ΔP_{j10}	Jouleovy ztráty naprázdno	U_{sp}	Spouštěcí napětí
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	$jX_{1\sigma}$	Reaktance statoru
ΔP_m	Ztráty mechanické	$jX_{2\sigma}'$	Reaktance rotoru přepočítaná na stator
ΔP_k	Ztráty nakrátko	jX_μ	Magnetizační reaktance
ΔP_{1kn}	Jmenovité ztráty nakrátko	X_{11}	Reaktance na svorkách statoru
ΔP_{j1k}	Jouleovy ztráty nakrátko - statorové	M_i	Vnitřní elektromagnetický moment
ΔP_{j2k}	Jouleovy ztráty nakrátko - rotorové	ΔM_m	Moment mechanických ztrát
ΔP_δ	Ztráty ve vzduchové mezeře	M_z	Moment záběrový
I_n	Proud jmenovitý	M_{zn}	Jmenovitý záběrový moment
I_{1n}	Proud jmenovitý - statoru	M_{\max}	Maximální moment
I_{10n}	Jmenovitý proud naprázdno	Z_{11}	Impedance na svorkách statoru
I_{1kn}	Jmenovitý proud nakrátko	n_n	Jmenovité otáčky
I_{zn}	Jmenovitý záběrový proud	ω_1	Úhlová rychlost synch.pole statoru
I_{\max}	Maximální hodnota proudu	ω	Úhlová rychlost
I_a	Amplituda proudu	m_1	Počet fází - statoru
I_1	Proud statoru	p	Počet pól párů
I_2'	Proud rotoru (přepočítaný na stator)	n_s	Synchronní otáčky
I_0	Proud střední větve NS	s_n	Jmenovitý skluz
$\cos \varphi$	Účinník	s_{\max}	Maximální skluz
$\cos \varphi_0$	Účinník naprázdno		
$\cos \varphi_k$	Účinník nakrátko		
R_1	Odpor statoru		
R_2'	Odpor rotoru přepočítaný na stator		
R_{Fe}	Odpor v železe		
$R_{1\varnothing 0}$	Odpor fáze statoru po zkoušce naprázdno		
R_{1zk}	Odpor fáze statoru po zkoušce nakrátko		

Obsah

Úvod.....	8
1. O asynchroním motoru	9
2. Nedostatky asynchronních motorů	10
2.1 Vysoký záběrný proud při rozběhu.....	11
3. Teoretický rozbor spouštění asynchronního motoru sníženým napětím	12
3.1 Moment asynchronního motoru.....	12
4. Metody spouštění asynchronních motorů sníženým napětím	14
4.1 Předřazení rezistoru nebo tlumivky do statorového vinutí	15
4.2 Autotransformátor.....	16
4.3 Přepínač hvězda/trojúhelník.....	17
4.4 Softstartér.....	19
4.4.1 Připojení softstartéru k motoru	20
4.4.2 Nastavení softstartéru	20
5. Náhradní schéma asynchronního motoru	23
5.1 Měření pro stanovení prvků náhradního schématu	24
5.1.1 Měření AM naprázdno.....	25
5.1.2. Měření AM nakrátko	28
5.2 Stanovení prvků náhradního schématu AM.....	33
6. Výpočet vnitřního momentu	37
7. Měření zatěžovacích charakteristik AM při spouštění z RAT	40
7.1 Momentová charakteristika AM	40
7.2 Proudová charakteristika AM	42
8. Spouštění motoru pomocí softstartéru	44
8.1 Nastavení rozběhových parametrů	44
8.2 Spouštění motoru naprázdno pomocí softstartéru.....	45
8.3 Porovnání časových průběhů proudů pro různá nastavení spouštěcích křivek.....	48
8.4 Časové průběhy napětí a proudu při zatížení AM.....	50
9. Vyhodnocení proudových poměrů při spouštění motoru z RAT a ze softstartéru.....	51
Závěr.....	53

0. Úvod

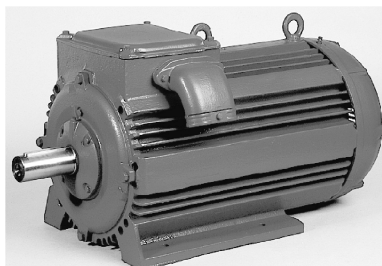
Dnešní svět je poznamenán mnoha významnými vynálezy. Nikola Tesla, geniální elektroinženýr v oblasti střídaných proudů, předal světu mnoho užitečných strojů, pracujících na jednoduchých i méně pochopitelných principech. Teslovy stroje, nalezneme v každém odvětví průmyslu a všude tam, kam vede elektrické vedení. Asynchronní motory patří mezi nejrozšířenější z jeho vynálezů.

Konstrukce asynchronního motoru se od doby Tesly zdokonalila. Vhodná úprava rotorového obvodu, dala vzniku různých typů asynchronních motorů. Jelikož asynchronní motor pracuje s omezenou účinností, zabýváme se jeho vlastnostmi, podstatnými z hlediska provozních stavů.

Podívejme na asynchronní motor a problematiku spojenou s jeho rozběhem o něco podrobněji, v následujících kapitolách.

1. O asynchroním motoru

Jako pohonné jednotky, ventilátory, výtahy, kompresory, jeřáby, čerpadla, atd., se v praxi osvědčily a značně rozšířily asynchronní motory (Obr. 1). Často slouží jako generátory, v malých vodních či větrných elektrárnách.



Obr. 1 Jeřábový asynchronní motor[5]

Jedná se o indukční stroje pracující na principu Lorenzova a Faradayova zákona.

Především díky jednoduché a levné konstrukci, která je výsledkem cca 100 let dlouhého vývoje, dnes tvoří asynchronní motor nejpočetnější skupinu elektrických strojů o výkonech wattů až po stroje o výkonech megawattů.

Je odhadováno, že téměř polovina celkové vyprodukované elektrické energie, slouží k napájení jednofázových a trojfázových asynchronních motorů [1]. Logicky je tedy snahou vývojářů rozvíjet takové konstrukce těchto strojů, které vyhovují vhodným poměrem kvality, ceny a účinnosti.

Nespornou výhodou AM oproti stejnosměrným motorům je absence komutátoru, článku, jež bývá častým zdrojem elektromagnetického rušení, vznikajícího vlivem jiskření mezi komutátorem a kartáči.

Možnost řízení rychlosti asynchronního motoru frekvenčním měničem, představuje pro stejnosměrné motory, v oblasti pohonů, velkého konkurenta. Zastaralé Ward - Leonardovo soustrojí se vyznačovalo řadou nevýhod, které v případě frekvenčního řízení odpadají.

2. Nedostatky asynchronních motorů

Stejně jako přemíra počítačů připojených k síti působí jako zdroj harmonických, které se zpětně projevují v kvalitě parametrů napájecí sítě, tak i spouštění asynchronních motorů vyšších výkonů, představuje problém nejen v oblasti harmonických.

Mezi podstatné nedostatky asynchronních motorů je vhodné zařadit:

a) Nutnost dodávky jalové energie z napájecí sítě

Jalový proud je možné dodat z připojeného kondenzátoru a tím odlehčit přívod od jalové složky proudu, která tvoří část celkových ztrát.

b) Regulace rychlosti otáček

Plynule regulovat otáčky je snadné v případě použití frekvenčního měniče

c) Účinnost

Je omezena konstrukcí, jakostí použitých materiálů a tedy i cenou.

d) Velký záběrný proud, po přímém připojení ke jmenovitému napětí

Je možné jej snížit dále popsanými metodami.

Zásadní vliv na velikost proudu protékajícího statorovým vinutím asynchronního motoru, má aktuální provozní stav, ve kterém se stroj nachází. Při rozběhu z nulových otáček motor odebírá tzv. záběrový proud I_z . Statorové pole se otáčí synchronními otáčkami, přičemž rotor stojí $n=0$ a $s=1$. Motor je v této chvíli ve stavu nakrátko. S rostoucími otáčkami rotoru, během rozběhu, proud klesá. V režimu trvalého chodu (S1), by motorem neměl protékat vyšší ekvivalentní oteplovací proud než je hodnota proudu jmenovitého. Velikost proudu, je mimo jiné, dána typem kotevního (rotorového) obvodu, impedancí a výkonem stroje. S rostoucím počtem pólových dvojic statoru, klesá poměrná hodnota záběrného proudu k proudu jmenovitému. V případě spouštění asynchronních motorů přímým připojením na síť, může záběrový proud nabývat hodnoty v rozmezí 4 až 7 I_n u motorů s kotvou nakrátko a 3 až 5 I_n u motorů s kotvou kroužkovou (vinutou). [4]

2.1 Vysoký záběrný proud při rozběhu

Proud tekoucí vinutím může způsobit:

1. Prudký nárůst oteplení stroje.

Dochází k němu vlivem ztrát nakrátko ΔP_k , které jsou úměrné $R \cdot I^2$ a jsou tvořeny ztrátami ve vinutí statoru ΔP_{j1} a rotoru ΔP_{j2}

2. Působení na ochranné prvky v obvodu.

Velký proud může způsobit podpětí, které aktivuje (vybaví) podpěťové ochrany. V případě použití rychlých pojistek může dojít k přetavení pojistky. Z tohoto důvodu se pro ochranu asynchronních motorů volí pojistky pomalé a jističe s motorovou charakteristikou typu C.

3. Úbytek napětí v síti.

Vlastnosti sítě v dané oblasti jsou pro spouštění motorů určujícím parametrem. Běžně se však přímým připojením k distribuční síti nedoporučuje připojovat motory s výkonem větším než 3kW [4]. Problém může nastat především v okrajových částech rozlehlých sítí, a všude tam, kde nelze zaručit dostatečnou „tvrdost“ napětí přívodu. Úbytek napětí se může významně projevit i u okolních odběratelů a negativně tak působit na jejich elektrická zařízení. Jiná situace nastává v případech, kdy máme vlastní distribuční transformátor a okolní odběratele neovlivníme.

Těmto nežádoucím stavům, lze předejít snížením záběrového proudu.

Velikost proudu vypočteme z Ohmova zákona následovně

$$I = \frac{U}{Z} \quad (2.1)$$

Z Ohmova zákona vyplývají dvě možnosti snížení záběrného proudu:

A. Zvýšení impedance obvodu

B. Snížení napětí

Zvýšíme – li impedanci obvodu, proud tekoucí obvodem klesne. Obdobné platí při snížení napětí.

3. Teoretický rozbor spouštění asynchronního motoru sníženým napětím

3.1 Moment asynchronního motoru

Točivé magnetické pole vybuze magnetomotorickým napětím F_m , působí vzájemně s rotorovými proudy a vytváří tak moment, který otáčí rotorem ve směru otáčení tohoto magnetického pole. [1]

Pro **výpočet vnitřního momentu** (3.1), vyjdeme z mechanického výkonu. Následující odvození jsou obdobná odvození, uvedená v lit. [1].

$$M_i = \frac{P'}{\omega} \quad (3.1)$$

přepočteme-li moment dle vztahu (11.10) z lit. [1], získáme rovnici

$$M_i = \frac{P_\delta}{\omega_1} \quad (3.2)$$

Jestliže pro elektrický výkon v rotorovém obvodu a výkon ve vzduchové mezeře platí

$$P_{el} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (3.3)$$

$$P_\delta = m_2 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 \quad (3.3)$$

pak odvození momentu lze zapsat

$$M_i = \frac{P_\delta}{\omega_1} = \frac{m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{\omega_1 \cdot s} = C \cdot \frac{R_2 \cdot I_2^2}{s} \quad (3.5)$$

Moment motoru je tedy přímo úměrný odporu rotoru, čtverci proudu rotorového obvodu a nepřímo úměrný skluzu.

Po přepočtu rotorových veličin na statorové, platí pro **výkon ve vzduchové mezeře**

$$P_\delta = m_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot I_2'^2 \quad (3.6)$$

Vnitřní moment se pak vypočítá

$$M_i = \frac{m_1 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2}{\omega_1 \cdot s} \quad (3.7)$$

přičemž **proud rotorového obvodu přepočítaný na stator** se spočte

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + C_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 \cdot X'_{2\sigma})^2}} \quad (3.8)$$

Po dosazení I'_2 , do vztahu pro moment, získáme výraz pro **vnitřní elektromagnetický moment motoru**

$$M_i = \pm \frac{m_1 \cdot R'_2}{\omega_1 \cdot s} \frac{U_1^2}{\left(R_1 + C_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 \cdot X'_{2\sigma})^2} \quad (3.9)$$

Znaménko (+) platí pro motor a (-) pro generátor.

Z odvozeného vztahu pro moment je zřejmé, že **moment je funkcí čtverce napětí**.

Pro **přepočet momentu, při napájení sníženým napětím**, platí vztah [1]

$$M_z = M_{zn} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1n}}\right)^2 = \left(\frac{I_{1z}}{I_{1zn}}\right)^2 \quad (3.10)$$

Přičemž **záběrný proud** je přímo úměrný napětí

$$I_z = I_{zn} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1n}}\right) \quad (3.11)$$

Z výše odvozeného lze konstatovat, že při snížení napětí na polovinu bude proud taktéž poloviční, kdežto moment klesne na čtvrtinu. Mohou nastat případy, ve kterých je moment pracovního mechanismu větší, než záběrný moment motoru napájeného sníženým napětím. V takovém případě k rozběhu motoru nedojde a narůstající oteplení může poškodit izolaci vinutí.

4. Metody spouštění asynchronních motorů sníženým napětím

- a) Předřazení rezistoru nebo tlumivky do statorového vinutí**
- b) Autotransformátor**
- c) Přepínač Y/D**
- d) Spouštění softstartérem**

Některé z uvedených metod vynikají jednoduchostí a nízkými pořizovacími náklady, na druhou stranu může být jejich provoz neekonomický z důvodu vzniku tepelných (Joulových) ztrát.

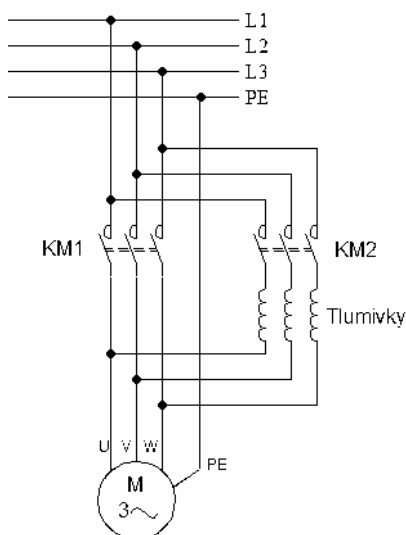
Softstartéry disponují schopností, být uživatelem snadno naprogramovány a lépe tak vyhovět daným požadavkům v konkrétní aplikaci, což se logicky promítá na jejich vyšší pořizovací ceně. Na druhou stranu mohou být softstartéry značným zdrojem harmonických v síti.

Podívejme se blíže na jednotlivé metody snížení napětí.

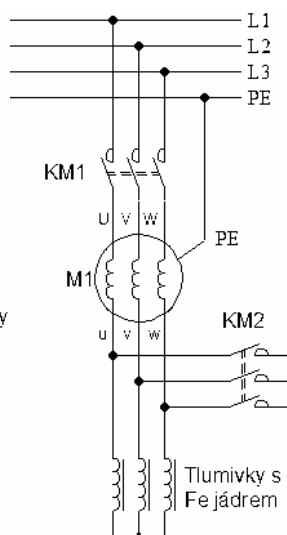
4.1 Předřazení rezistoru nebo tlumivky do vinutí statoru

Účelem tlumivky či rezistoru, zapojeného do série se statorovým vinutím, je snížit napětí na cca $0,6 \div 0,7 U_{In}$. [1]

Na Obr. 4.1a a 4.1b vidíme zapojení s tlumivkami.



Obr. 4.1a



Obr. 4.1b

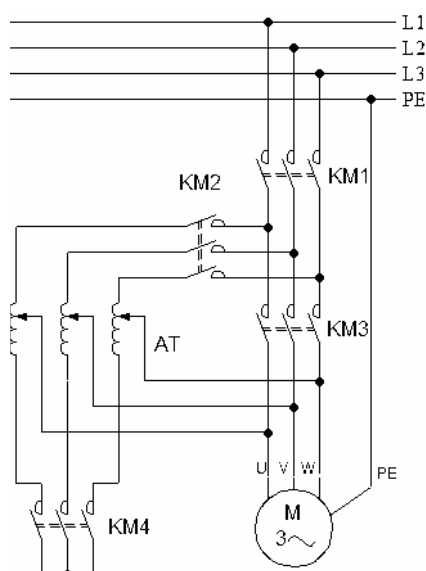
Při spouštění motoru je stykač KM1 v rozepnutém stavu, kdežto KM2 ve stavu sepnutém. Napětí na statoru je tedy omezeno o úbytek napětí na vložených tlumivkách. V určité fázi rozběhu dojde k překlenutí těchto prvků stykačem KM1, což má za následek připojení statoru na již plné napájecí napětí.

U motorů větších výkonů připojených na síť o vyšší napěťové hladině, používáme tlumivky se železným jádrem. Ty jsou na jedné straně spojeny do hvězdy a druhým koncem připojeny na konce vinutí statoru (Obr. 4.1b). Nejprve spíná stykač KM1, po rozběhu se konce vinutí statoru spojí do hvězdy a proudy se nyní uzavírají přes uzel stykače KM2, čímž je rozběh i konce. [1]

Při spouštění vznikají na tlumivkách značné tepelné ztráty.

4.2 Spouštění autotransfornátorem

Jedná se o dřívější způsob spouštění, dnes je již také nahrazený modernějšími prostředky. Pro tento příklad je použito Korndorfferovo zapojení zakreslené v Obr. 4.2. [1]



Obr. 4.2

Stykač KM4 představuje spínač uzlu autotransfornátoru a je při rozběhu sepnut, stejně tak i stykač KM1 a KM2.

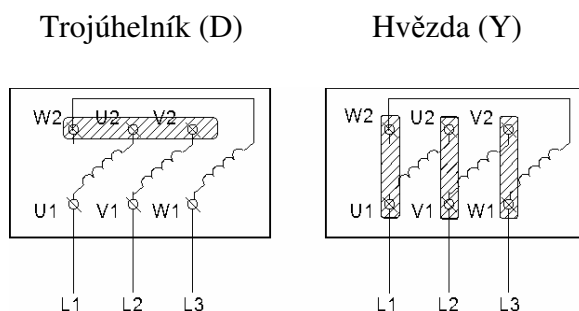
Rotor začne zvyšovat otáčky a v dané chvíli rozezne stykač KM4. Autotransfornátor nyní pracuje jako tlumivka. Nakonec sepnou stykač KM3 a KM2 rozezne, tím dojde k odpojení autotransfornátoru a rozběh motoru je dokončen. [1]

Taktéž, jako v předchozím případě, se při spouštění nevyhneme vzniku Jouleových ztrát.

4.3 Přepínač hvězda/trojúhelník - Y/D

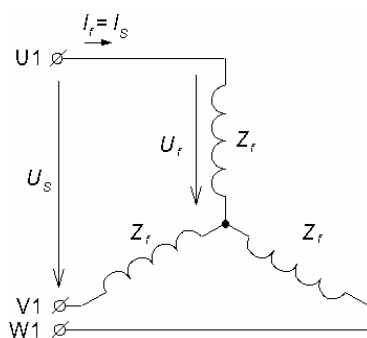
Jedná se o jednoduchý a hojně rozšířený způsob spouštění především menších a středně výkonných motorů zhruba do 15 – 20 kW. Tento způsob lze využít pouze u motorů s vyvedenými oběma konci vinutí statoru.

Zapojení svorkovnice do Y a do D vidíme na Obr. 4.3.

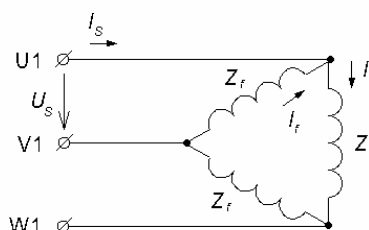


Obr. 4.3

Rozložení napětí a proudů na vinutí v zapojení do Y a do D, znázorňují Obr. 4.3a, 4.3b.



Obr. 4.3a Vinutí zapojeno do „Y“



Obr. 4.3b Vinutí zapojeno do „D“

Při spouštění je **vinutí statoru zapojeno do hvězdy**. Na impedanci jedné fáze Z_f je připojeno **fázové napětí** o velikosti

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

V tomto případě každým vinutím **protéká proud fázový I_{fY}** , pro který platí

$$I_{fY} = I_{sY} = \frac{U_f}{Z_f} = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z_f} \quad (4.2)$$

Po přepnutí vinutí z Y do D (Obr. 4.3b) bude na každém vinutí **napětí sdružené**, pro které platí

$$U_{sD} = \sqrt{3} \cdot U_{fD} \quad (4.3)$$

Proud v každém vinutí, bude fázový

$$I_{fD} = \frac{U_s}{Z_f} \quad (4.4)$$

Přívodními vodiči protékají proudy sdružené

$$I_{sD} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_s}{Z_f} = \sqrt{3} \cdot I_{fD} \quad (4.5)$$

Z poměrného vztahu lehce odvodíme, že **záběrný proud v zapojení do „Y“ je třetinový oproti zapojení do „D“**.

$$\frac{I_{sY}}{I_{sD}} = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z_f}}{\sqrt{3} \cdot \frac{U_s}{Z_f}} = \frac{1}{3} \quad (4.6)$$

Jak již bylo výše odvozeno, **moment je funkcí čtverce napětí**.

$$\frac{M_{zY}}{M_{zD}} \approx \left(\frac{U_f}{U_s} \right)^2 = \left(\frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot U_f} \right)^2 = \frac{1}{3} \quad (4.7)$$

Na počátku rozběhu, kdy je vinutí zapojeno do hvězdy, je záběrný moment stejně jako proud, takéž třetinový.

Výhodou této metody spouštění, je **stejná úměra snížení záběrného proudu a momentu**.

4.4 Softstartér

Softstartér při rozběhu postupně zvyšuje napětí a tím umožní hladký rozběh a omezení záběrného proudu.

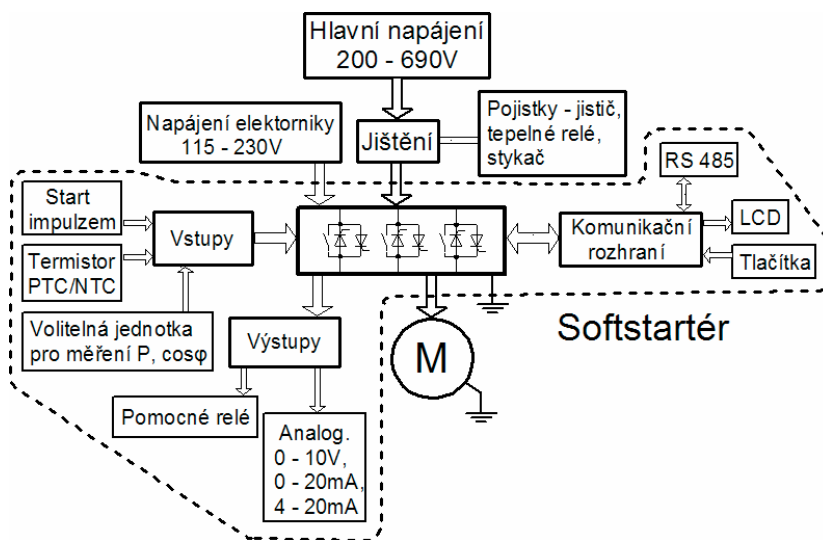
Jakmile je rozběh u konce, vnitřní procesor softstartéru aktivuje interní relé obchvatu tzv. bypass a tím dojde k překlenutí spínaného (tyristorového) obvodu. Po rozběhu se tak ušetří energie vyzařovaná z elektroniky v podobě tepla. Softstartér je schopen stejným způsobem řídit i doběh motoru.

Pro podrobnější objasnění funkcí a vlastností softstartéru, nám poslouží **rozběr softstartéru od firmy SOLCON konkrétně jde o typ RVS-DX44**, na kterém byla provedena laboratorní měření.

Koncové číslo v názvu označuje maximální velikost proudu softstartéru, tedy 44A. při volbě softstartéru, vycházíme z nominální hodnoty proudu, uvedené na štítku motoru. [6]

Softstartér slouží ke spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko a kroužkových asynchronních motorů.

Blokově zakreslenou soustavu softstartéru připojeného k napájení a motoru, nalezneme na Obr. 4.4



Obr. 4.4 Blokové schéma softstartéru

4.4.1 Připojení softstartéru k motoru

1) Standardní připojení softstartéru ke svorkám statorového vinutí zapojeného do hvězdy

Připojení softstartéru na statorové vinutí spojené do hvězdy je vhodné v případě požadavku na vyšší záběrový proud, kterého není v zapojení „uvnitř trojúhelníku“ možno dosáhnout.

2) Zapojení „uvnitř trojúhelníku“

Tento způsob zapojení, nám dovoluje volit typ jednotky softstartéru, s ohledem na velikost proudu, který je v tomto případě $1/\sqrt{3}$ krát menší, než v případě zapojení do hvězdy. Na druhou stranu je nevýhodou zvýšená produkce harmonických. Úroveň THD může oproti zapojení do hvězdy být až dvojnásobná. Přítomnost harmonických se stává zdrojem nežádoucího oteplení a často vyžaduje aplikaci odrušovacích filtrů. Další nevýhodou oproti zapojení do hvězdy je redukováný výběr rozběhových křivek a absence volby napěťového impulsu. [6]

4.4.2 Nastavení softstartéru

Veškeré parametry je možné jednoduše nastavit prostřednictvím 6 tlačítkové klávesnice a 2x16 znakového LCD, stejně tak nastavení ochran a to ve čtyřech světových jazycích.

Nastavení ochran

Softstartér disponuje nastavitelnými ochranami proti: Přetížení, přepětí, podpětí, dále je pak schopen registrovat ztrátu fáze, nesprávný sled fází, zkrat ve vinutí statoru, přehřátí chladiče, atd....

Spouštěcí parametry měkkého rozběhu:

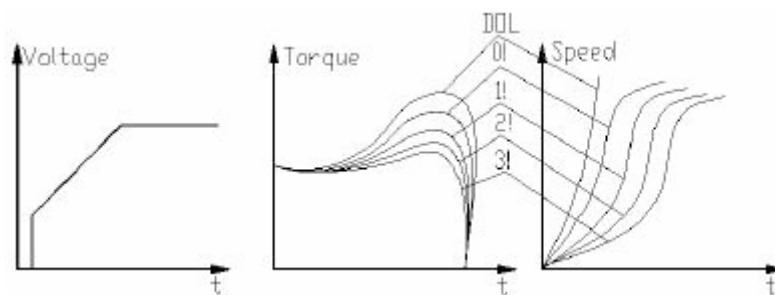
- A. Výběr rozběhové křivky
- B. Nastavení doby napěťového impulzu na začátku rozběhu (0 – 1 s) má za úkol pohnout se zátěží při začátku rozběhu.
- C. Nastavení počátečního napětí (10 – 50 % U_n) má vyšší prioritu než nastavení počátečního proudu.
- D. Nastavení počátečního proudu (100 – 400 % I_n) zajistí rozběh motoru po proudové rampě v případě nastavení počátečního napětí nad hodnotu 50%
- E. Nastavení maximálního povoleného proudu při rozběhu (100 – 400 % I_n)
- F. Nastavení doby rozběhu (10 – 30 s)
- G. Nastavení maximální doby rozběhu (1 – 3 s)
- H. Nastavení dovoleného počtu rozběhů za stanovený časový úsek (vyp/1 - 10)
- I. Nastavení časového úseku pro omezený počet rozběhů (1 – 60 min)
- J. Nastavení doby, po kterou je rozběh zakázán, pokud dojde k překročení dovoleného počtu rozběhů

Rozběhové křivky

Pro měkký start máme k dispozici výběr z rozběhových křivek 0, 1, 2, 3, 4. Při volbě vhodné rozběhové křivky začínáme vždy křivkou 0, popř. volíme jednu ze zbývajících křivek.

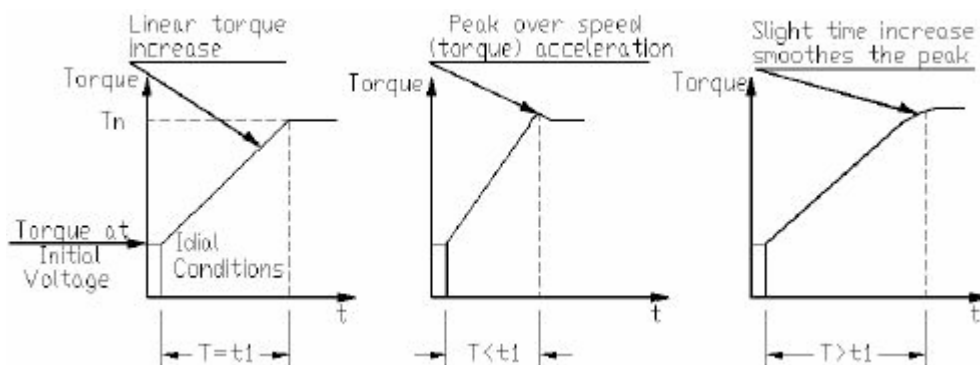
V oblasti končícího rozběhu se může u indukčních motorů neblaze projevit vysoká hodnota momentu zvratu, která převyšuje jmenovitou hodnotu momentu. Toto se může negativně projevit u čerpadel, kdy dojde k náhlým zvýšením tlaku v potrubí.[6]

- **Rozběhová křivka – 0** je standardní rozběhovou nejvíce stabilní křivkou, implicitně nastavenou výrobcem, s ohledem na co nejkratší optimální start a oteplení.
- **Rozběhová křivka - 1 až 3** slouží pro rozběh čerpadel. Účelem těchto křivek je automatická regulace zvýšeného momentu.



Obr. 3.4.1 Časový průběh napětí, momentu a rychlosti rozběhu [6]

- **Rozběhová křivka - 4 (momentová)** je taktéž vhodná pro spouštění čerpadel. Zajistí rozběh motoru řízením momentu, čímž zamezí vzniku vysokého momentu v oblasti končícího rozběhu. Momentová křivka se užívá až tehdy, jestliže ostatní křivky rozběhu nevyhovují. [6]

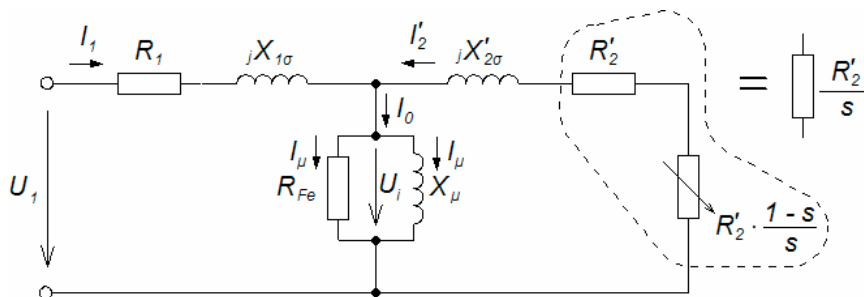


Obr. 3.4.2 Omezení prudkého nárůstu momentu na konci rozběhu, zajišťuje volba vhodné křivky [6]

Nastavení doběhových parametrů je obdobné spouštěcím, navíc je zde možnost nastavení konečného momentu, při kterém je doběh ukončen (napětí klesne na 0 V).

5. Náhradní schéma asynchronního motoru

Představuje matematický model AM. Náhradní schéma v zapojení do článku T je na Obr. 5.



Obr. 5 Náhradní schéma asynchronního motoru

Vhodným spojením prvků odporů a reaktancí, můžeme jednotlivá vinutí statoru a rotoru spolu se vzduchovou mezerou nahradit tak, že odpor R_1 a induktivní reaktance $X_{1\sigma}$ statorového vinutí, představují impedanci statorového vinutí.

Odpor R_2' a induktivní reaktance $X_{2\sigma}'$ představují impedanci rotorového vinutí přepočítanou na stator, přičemž odpor rotoru R_2' představuje konstantní část celkového odporu rotoru a výraz

$$R_2' \cdot \frac{1-s}{s} \quad (5.1)$$

vyjadřuje na zatížení (skluzu) závislou část odporu rotoru.

Pro celkový odpor rotoru je možné psát

$$R_2' + R_2' \cdot \frac{1-s}{s} = \frac{R_2'}{s} \quad (5.2)$$

Příčnou větev tvoří odpor v železe R_{Fe} a magnetizační reaktance X_μ .

5.1. Měření pro stanovení prvků náhradního schématu

Laboratorní měření probíhalo na trojfázovém asynchronním hutním jeřábovém kroužkovém motoru P112M06 od firmy Siemens, který byl k dispozici ve školní laboratoři.

Ke sběru měřených dat, nám posloužila měřicí soustava spojená s virtuálním prostředím programu LAB VIEW.

Jeřábové motory, jsou dimenzovány s ohledem na častější rozběh a změnu rychlosti.

V katalogu výrobce [5] nalezneme jmenovité parametry motoru uvedené v tab.5.

<i>Asynchronní hutní jeřábový kroužkový motor</i>			
$P_n=2\text{ kW}$	$Y - Y$		
$f_n=50\text{ Hz}$	$U_1=380\text{ V}$	$U_2=90\text{ V}$	$M_n=21,1\text{ Nm}$
$n_n=905\text{ ot/min}$	$I_1=7,4\text{ A}$	$I_2=15,5\text{ A}$	$M_{max}/M_n=2,8$
$n_s=1000\text{ ot/min}$	$2p=6$	$R_2/20^\circ\text{ C}=0,22\ \Omega$	$z=40\ \%$

Tab. 5 Výběr z katalogových parametrů motoru

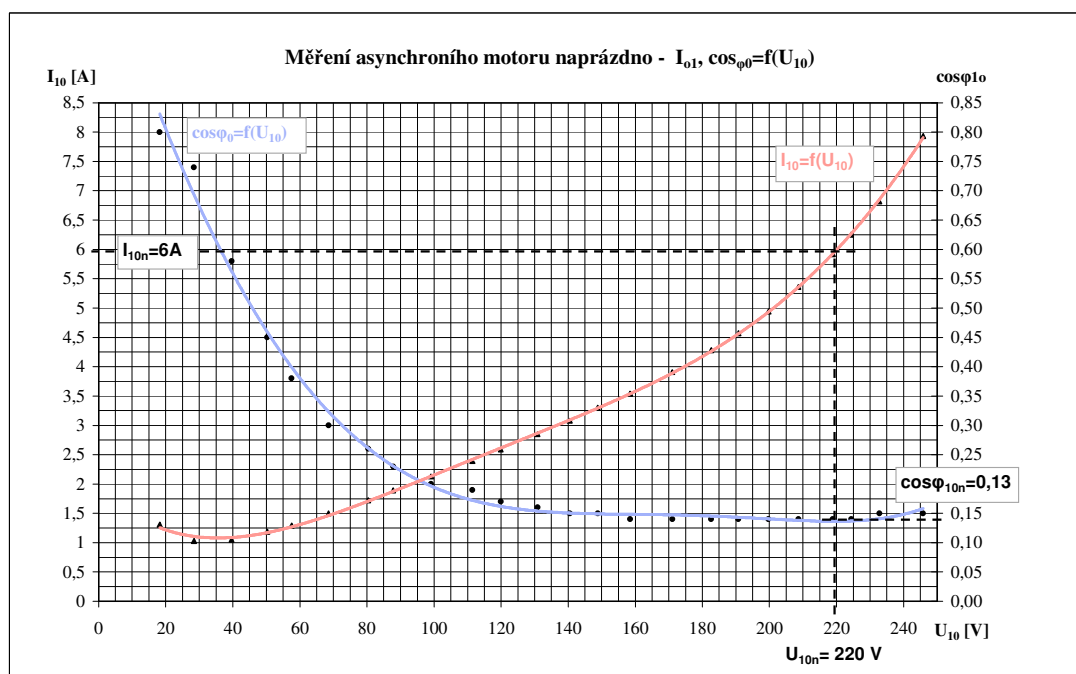
5.1.1. Měření AM naprázdno

Provádí se při jmenovité frekvenci, v oblasti konstantních otáček.[2]

Při měření jsme snižovali napětí z hodnoty 130 % U_n až do chvíle, kdy proud začal narůstat vlivem nedostatečného točivého momentu nutného na překonání momentu mechanických ztrát způsobených třením v ložiskách. Hodnoty zaznamenané při laboratorním měření, slouží pro vykreslení závislostí ΔP_0 , I_0 , $\cos\varphi_0=f(U_{10})$.

Proud a účinník naprázdno

Graf funkcí I_0 , $\cos\varphi_0=f(U_{10})$ vidíme na Obr. 5.1.



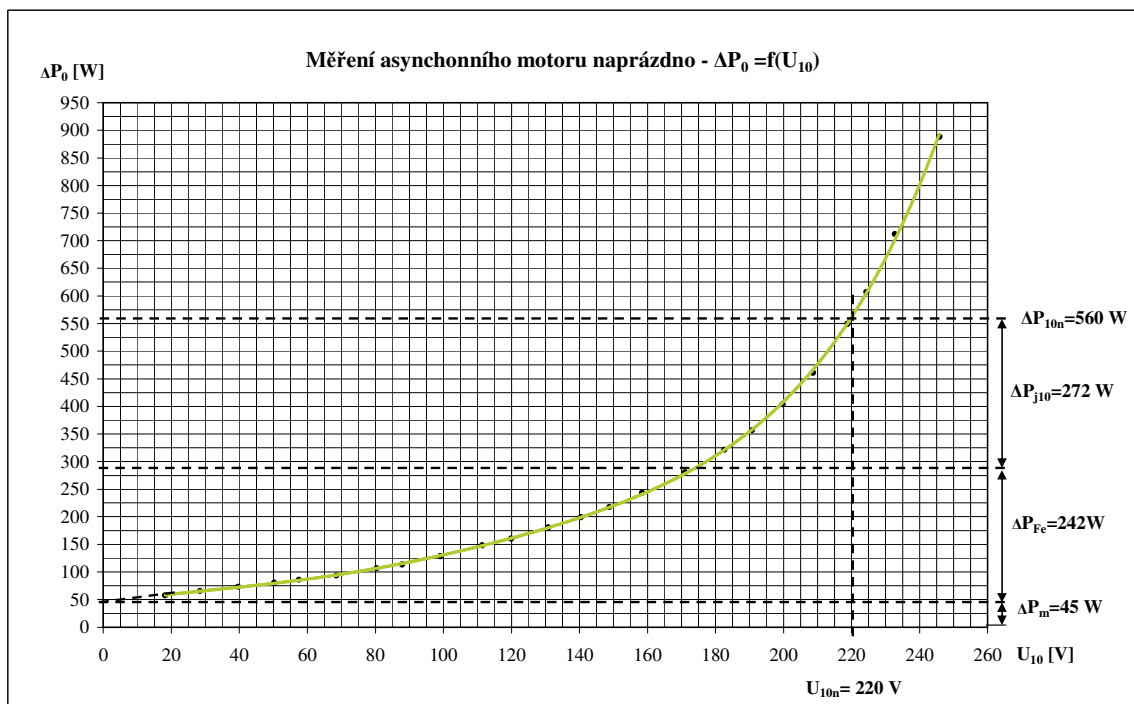
Obr. 5.1 Průběh proudu a účinníku při měření naprázdno s odečtenými jmenovitými hodnotami.

Hodnoty získané ze závislosti I_0 , $\cos\varphi_0=f(U_{10})$:

Proud naprázdno $I_{10n}=6$ A, účinník naprázdno $\cos\varphi_{10n}=0,13$.

Ztráty naprázdno

Z charakteristik změřených naprázdno (Obr. 5.2), lze pro jmenovitou (fázovou) hodnotu napětí $U_{1n} = 220 \text{ V}$ odečíst **jmenovité ztráty naprázdno** $\Delta P_{10n} = 560 \text{ W}$, zahrnující dílčí složky **ztrát** (ΔP_{j10} , ΔP_{Fe} a ΔP_m).



Obr. 5.2 Průběh činných ztrát při měření naprázdno závislosti na napájecím

Dílčí složky ztrát naprázdno

Složku Joulových ztrát vyvinutých v mědi statorového vinutí, vypočítáme podle vztahu

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_{1f} \cdot I_{10}^2 = 3 \cdot 2,52 \cdot 6^2 = \underline{272,16 \text{ W}} \quad (5.3)$$

Velikost mechanických ztrát jsem určil jako průsečík extrapolované křivky ztrát s osou výkonu.

$$\Delta P_m = \underline{45 \text{ W}} \quad (5.4)$$

Ztráty v železe odvodíme ze vztahu

$$\Delta P_{10n} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_M + \Delta P_{j10} \Rightarrow \Delta P_{Fe} = \Delta P_{10n} - \Delta P_{j10} - \Delta P_M \quad (5.6)$$

po dosazení získáme **ztráty v železe**

$$\Delta P_{Fe} = 567 - 272,16 - 45 = \underline{249,84 \text{ W}} \quad (5.7)$$

Měření odporu vinutí po zkoušce naprázdno

Hodnota odporu jedné fáze (R_{1f}) vinutí statoru byla naměřena přístrojem Milli-Ohm Meter GOM-801 s rozlišením 0,01 Ω , pro námi zvolený rozsah 10 Ω . Velikost odporů vinutí je závislá na teplotě okolí, je tedy zapotřebí hodnoty odporů sjednotit přepočtem (5.8). Jelikož vinutí statoru je zapojeno do hvězdy, je zapotřebí pro zjištění velikosti odporu jedné fáze, naměřený odpor podělit dvěma a přepočítat na teplotu 20 °C, dosazením do vztahu (5.8). [4]

Teplota okolí $t=21,5$ °C, byla naměřena digitálním teploměrem.

$$R_{20f} = R_{1f} \cdot \frac{235 + 20}{235 + t} = 2,53 \cdot \frac{235 + 20}{235 + 21,5} = \underline{2,52 \Omega} \quad (5.8)$$

Průměrný odpor vinutí jedné fáze změřený po zkoušce naprázdno a přepočítaný na 20°C, má velikost $R_{20f}=2,52 \Omega$.

Obdobný přepočet (5.8) platí pro odpor vinutí naměřený po zkoušce nakrátko.

5.1.2 Měření AM nakrátko

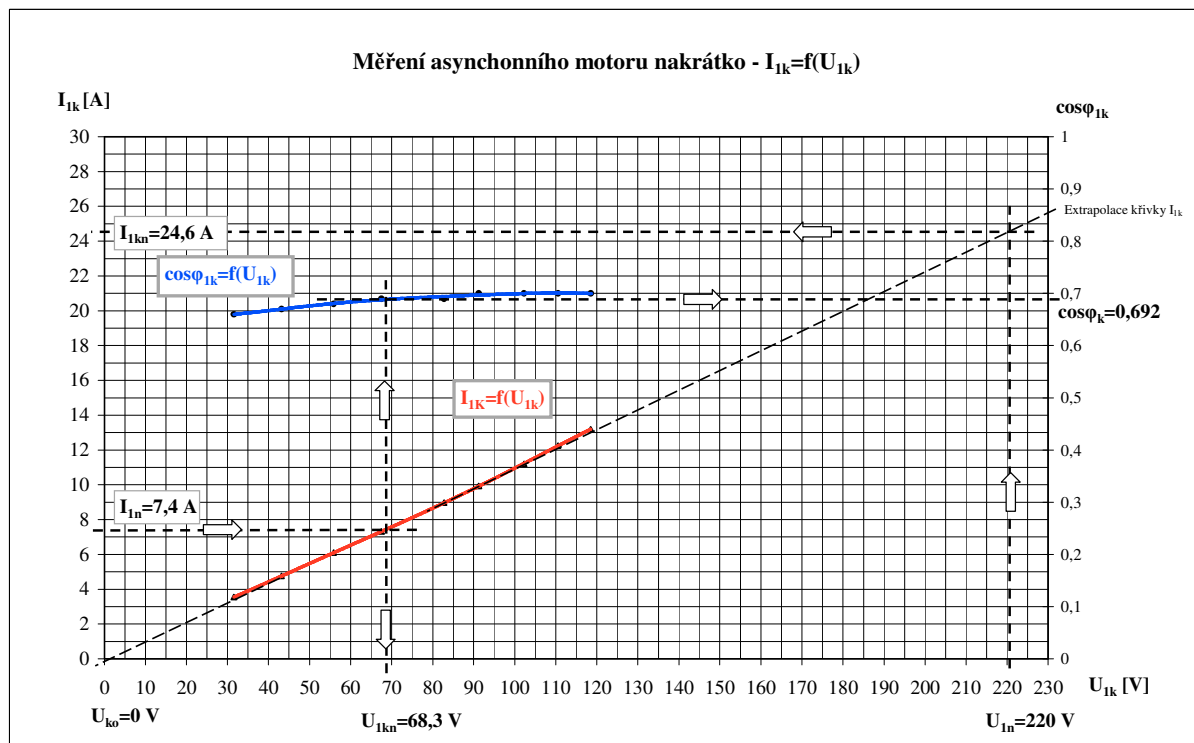
Při tomto měření byl motor napájen od 130 % I_{In} po několika měřicích stupních směrem dolů. Rotor se neotáčel, neboť byl blokován dynamometrem. Měřením motoru nakrátko zjišťujeme funkce I_{Ik} , $\cos\varphi_k$ a $\Delta P_k=f(U_{Ik})$. Hodnoty získané měřením motoru nakrátko, nalezneme v tab. 5.2.

U_{kf} [V]	I_k [A]	$\cos\varphi_k$ [-]	P_k [W]	M_k [Nm]
118,56	13,2	0,7	3321	16,28
110,56	12,26	0,7	2850,59	14,03
102,27	11,21	0,7	2407,98	11,77
91,23	9,93	0,7	1894,25	9,32
82,78	8,97	0,69	1547,21	7,46
67,53	7,31	0,69	1020,05	4,91
55,85	6,1	0,68	695,68	3,34
43,2	4,76	0,67	415,34	1,96
31,59	3,55	0,66	222,22	0,78

Tab. 5.1.2 Tabulka hodnot získaných měřením AM nakrátko

Proud a účinník nakrátko

Z vynesných charakteristik $I_{1k}, \cos\varphi_k=f(U_{1k})$ na Obr. 5.1.2a, jsem pro jmenovitou hodnotu proudu $I_{1n}=7,4$ A, stanovil odpovídající **jmenovité napětí nakrátko** $U_{1kn}=68,3$ V.



Obr. 5.3 Průběh proudu a účinníku při měření nakrátko s odečtenými jmenovitými hodnotami.

Průsečíkem extrapolovaného průběhu $I_{1k}=f(U_{1k})$ s napětovou úrovní $U_{1n}=220$ V zjistíme velikost **jmenovitého proudu nakrátko** $I_{1kn}=24,6$ A. Matematickým vyjádřením (5.9), získáme jmenovitý záběrný proud při jmenovitém napětí [4].

$$I_{1kn} = I_{1n} \frac{U_{1n}}{U_{1kn}} = 7,4 \cdot \frac{220}{68,3} = 23,84 \text{ A} \quad (5.9)$$

Po připojení k plnému svorkovému napětí 220 V by motorem protékal jmenovitý proud nakrátko, který odpovídá záběrovému proudu I_z . Rozdíl hodnoty I_{1kn} odečtené z grafu od hodnoty vypočtené, lze v určité míře předpokládat.

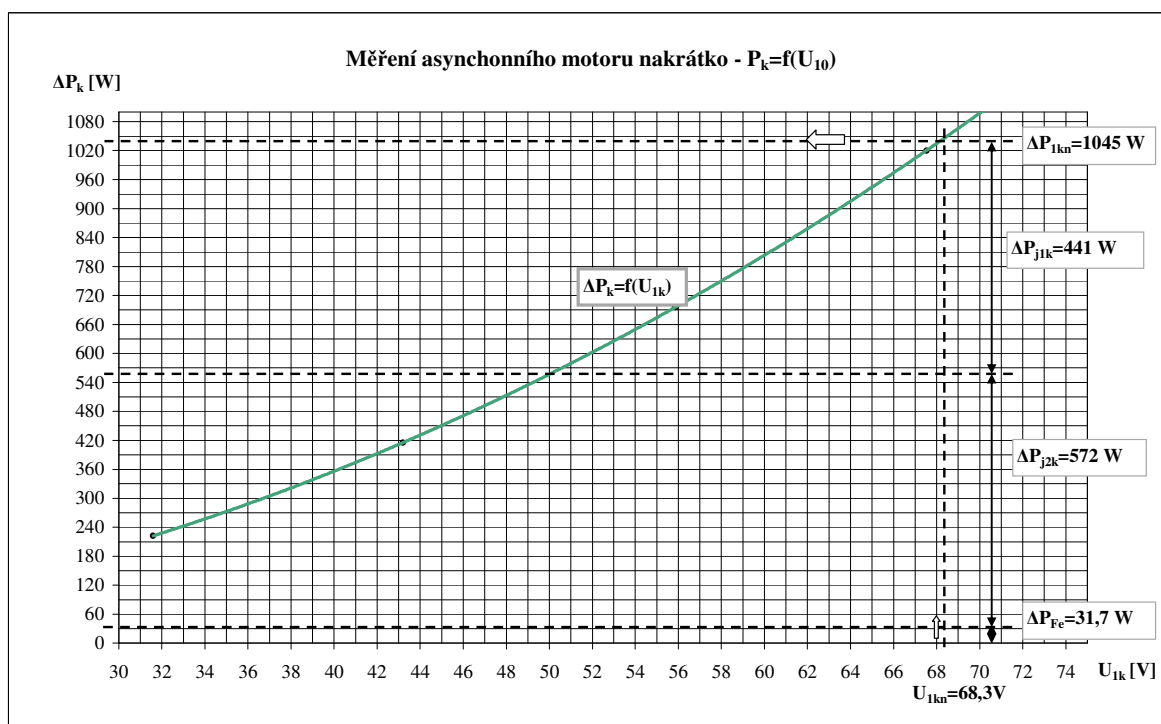
Poměr proudů k_i získáme z poměru proudů

$$k_i = \frac{I_{1kn}}{I_{1n}} = \frac{23,84}{7,4} = \underline{\underline{3,22}} \quad (5.10)$$

Z hodnoty poměru vyplývá vhodnost užití motoru v jeřábových aplikacích a všude tam, kde dochází k častému přerušovanému chodu, či zatížení. Náš motor disponuje zatěžovatelem 40 %.

Ztráty nakrátko

Z průběhu ztrát nakrátko (Obr. 7), lze odečíst jmenovité ztráty nakrátko $\Delta P_{1kn}=1045$ W při jmenovitém napětí nakrátko. Opět i tyto ztráty můžeme rozložit na dílčí složky, a to na ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1k} , rotoru ΔP_{j2k} a ztráty v železe ΔP_{Fe} . Ztráty mechanické zanedbáme, neboť pohyb rotoru není umožněn.



Obr. 5.4 Průběh ztrát z měření AM nakrátko s rozložením jednotlivých složek

Výpočet dílčích ztrát nakrátko

Z měření naprázdno uvažujeme **velikost ztrát v železe** při napětí 68,3 V

$$\Delta P_{Fe} = \underline{\underline{31,7 \text{ W}}} \quad (5.11)$$

Tepelné (Jouleovy) ztráty ve statoru

$$\Delta P_{j1k} = 3 \cdot R_{1kf} \cdot I_{1n}^2 = 3 \cdot 2,685 \cdot 7,4^2 = \underline{\underline{441 \text{ W}}} \quad (5.12)$$

Jouleovy ztráty v rotorovém obvodu vyjádříme z celkových ztrát

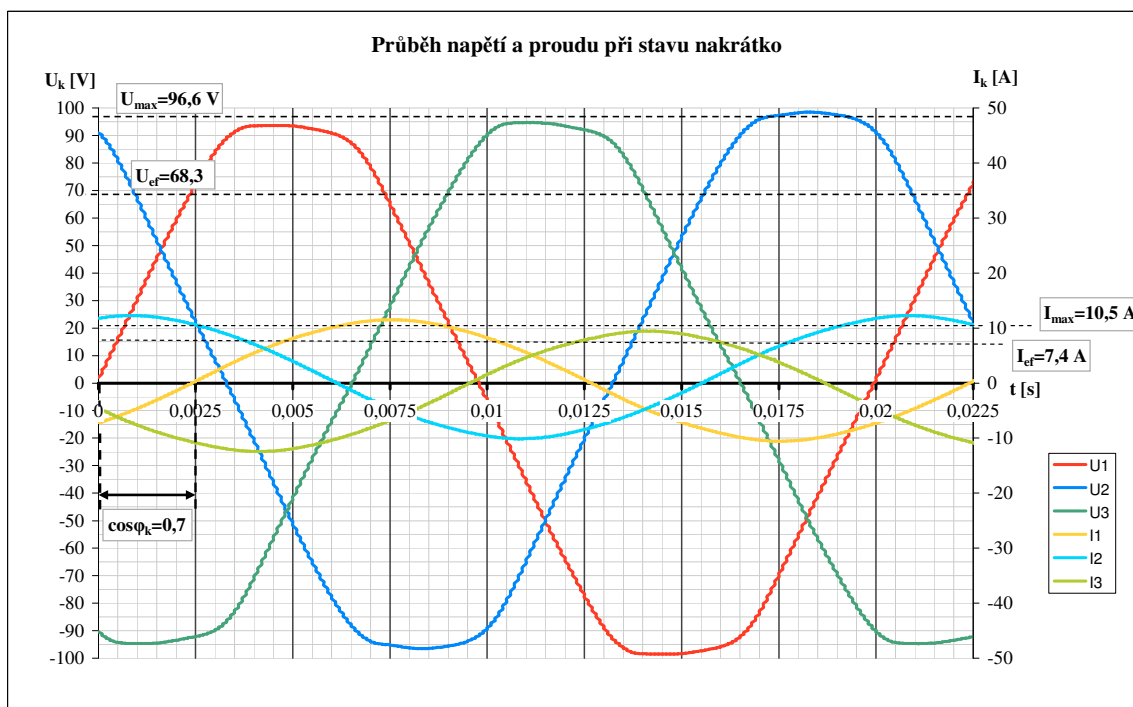
$$\Delta P_{1kn} = \Delta P_{j1k} + \Delta P_{j2k} + \Delta P_{Fe} \Rightarrow \Delta P_{j2k} = \Delta P_{1kn} - \Delta P_{j1k} - \Delta P_{Fe} \quad 5.13)$$

po dosazení získáme

$$\Delta P_{j2k} = 1045 - 441 - 31,68 = \underline{\underline{572 \text{ W}}} \quad (5.14)$$

Účinník nakrátko je větší, než ve stavu naprázdno, jelikož motorem protéká pouze magnetizační proud. Účinník je dle výpočtu (5.15) přibližně stejný, jako účinník odečtení z Obr. 5 zachycujícím **detail okamžitého časového průběhu napětí a proudu při stavu nakrátko**.

$$\cos \varphi_k = \frac{\Delta P_{1kn}}{3 \cdot U_{1kn} \cdot I_{1n}} = \frac{1045}{3 \cdot 68,3 \cdot 7,4} = \underline{\underline{0,689}} \quad (5.15)$$



Obr. 5.5 Časový průběh napětí a proudu při stavu nakrátko (obvodem teče jmenovitý proud).

Časovému zpoždění proudu za napětím $\Delta t = 2,5$ ms, odpovídá účinník nakrátko $\cos \varphi_k = 0,7$. Při bližším pohledu na zaznamenaný průběh napětí a proudu při stavu nakrátko na (Obr. 5), kdy vinutím statoru protékal jmenovitý proud $I_{1n} = 7,4$ A, je možné přibližně odečíst **průměrnou amplitudu proudu a napětí**.

Efektivní hodnotu napětí získáme ze vztahu

$$U_{ef} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{96,6}{\sqrt{2}} = \underline{\underline{68,3 \text{ V}}} \quad (5.16)$$

Na časových průbězích napětí je patrná deformace sinusového průběhu napětí, způsobená harmonickými produkovanými spotřebiči s nelineárním odběrem, které jsou napájeny z téhož rozvodu jako námi měřený motor.

5.2 Stanovení prvků náhradního schématu asynchronního motoru

Vynesené průběhy hodnot, z dat naměřených v laboratoři, nám dovolují stanovit některé potřebné jmenovité a maximální hodnoty proudu, ztrát a momentu. Výpočtem hodnot prvků obsažených v náhradním schématu, získáme požadované vstupní parametry pro dosazení do rovnice pro vnitřní moment (3.9). Vypočítáme hodnotu vnitřního elektromagnetického momentu, dále můžeme vypočítat jmenovitý a záběrový moment. S určitou přesností by takto vypočtené hodnoty měly korespondovat s údaji odečtenými z naměřených charakteristik.

Prvky náhradního schématu můžeme stanovit díky výsledkům laboratorního měření a níže provedeným výpočtům. *Výpočty jsou provedeny pro jednu fázi, dle [4].*

Uvedme si potřebné hodnoty, z nich při výpočtu prvků náhradního schématu vycházíme:

- **Jmenovité parametry motoru:**

$$U_n = 380 \text{ V} \Rightarrow \underline{U_{nf} = 220 \text{ V}}$$

$$I_n = 7,4 \text{ A}$$

$$P_n = 2 \text{ kW}$$

- **Hodnoty získané měřením AM naprázdno**

Hodnoty odečtené z charakteristik naprázdno při $U_{1n}=220 \text{ V}$

$$I_{10n} = 6 \text{ A}$$

$$\Delta P_{0n} = 560 \text{ W}$$

$$\Delta P_m = 45 \text{ W}$$

Odpor vinutí jedné fáze změřený po zkoušce naprázdno, přepočítaný na 20°C

$$R_{10\vartheta} = 2,52 \Omega$$

- **Hodnoty získané měřením AM nakrátko**

Hodnoty odečtené z charakteristik nakrátko, při $I_{1n}=7,4 \text{ A}$

$$U_{1kn} = 68,3 \text{ V}$$

$$U_{k0} = 3,25 \text{ V}$$

$$\Delta P_{1kn} = 1045 \text{ W}$$

Odpor vinutí jedné fáze změřený po zkoušce nakrátko a přepočítaný na 20 °C

$$R_{1k\vartheta} = 2,685 \, \Omega \quad (5.17)$$

Při výpočtu prvků náhradního schématu **vyjdeme ze vztahu pro celkové ztráty nakrátko** a odvodíme rovnici pro **odpor rotoru přepočítaný na stator**.

$$\Delta P_k = 3 \cdot R_k \cdot I_k^2 = 3 \cdot (R_{1k\vartheta} + R_2') \cdot I_k^2 \Rightarrow R_2' = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot I_k^2} - R_{1k\vartheta} \quad (5.18)$$

Dosazením získáme **odpor rotoru přepočítaný na stator**

$$R_2' = \frac{1045}{3 \cdot 7,4^2} - 2,685 = \underline{\underline{3,676 \, \Omega}} \quad (9.19)$$

Odpor nakrátko je složen z odporů

$$R_k = R_{1k\vartheta} + R_2' = 2,685 + 3,676 = \underline{\underline{6,361 \, \Omega}} \quad (5.20)$$

Jestliže se **impedance nakrátko** spočítá

$$Z_k = \frac{U_{1kn}}{I_{1n}} = \frac{68,3}{7,4} = \underline{\underline{9,23 \, \Omega}} \quad (5.21)$$

pak **reaktance nakrátko** má velikost

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{9,23^2 - 6,361^2} = \underline{\underline{6,688 \, \Omega}} \quad (5.22)$$

Za předpokladu **rovnosti reaktancí**

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}'$$

vyjádříme **reaktanci statorového vinutí** jako polovinu reaktance nakrátko

$$X_{1\sigma} = \frac{X_k}{2} = \frac{6,688}{2} = \underline{\underline{3,344 \, \Omega}} \quad (5.23)$$

Druhá polovina připadá na **reaktanci rotoru přepočítanou na stator**

$$X_{2\sigma}' = \underline{\underline{3,344 \, \Omega}} \quad (5.24)$$

Díky měření naprázdno, můžeme vypočítat:

Jouleovy ztráty ve statoru

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_{10\vartheta} \cdot I_{10n}^2 = 3 \cdot 2,52 \cdot 6^2 = \underline{\underline{272,16 \, W}} \quad (5.25)$$

Ztráty v železe stanovíme ze vztahu

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{on} - \Delta P_{j10} - \Delta P_m = 560 - 272,16 - 45 = \underline{\underline{242,84 \, W}} \quad (5.26)$$

Odpor v železe odvodíme následovně

$$\Delta P_{Fe} = 3 \cdot R_{Fe} \cdot I_{Fe}^2 = 3 \cdot R_{Fe} \cdot \left(\frac{U_{1n}}{R_{Fe}} \right)^2 \Rightarrow R_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_{1n}^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (5.27)$$

Odpor v železe získáme po dosazení

$$R_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_{1n}^2}{\Delta P_{Fe}} = 3 \cdot \frac{220^2}{242,84} = \underline{\underline{597,925 \, \Omega}} \quad (5.28)$$

Účinník naprázdno stanovíme následovně

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_{0n}}{3 \cdot U_{1n} I_{10n}} = \frac{560}{3 \cdot 220 \cdot 6} = \underline{\underline{0,141}} \quad (5.30)$$

Impedanci Z_{11} na svorkách statoru spočítáme z Ohmova zákona

$$Z_{11} = \frac{U_{1n}}{I_{10n}} = \frac{220}{6} = \underline{\underline{36,667 \, \Omega}} \quad (5.31)$$

Reaktanci X_{11} na svorkách statoru vypočteme z impedance násobené sinem úhlu φ_0

$$\sin \varphi_0 = 0,99$$

$$X_{11} = Z_{11} \cdot \sin \varphi_0 = 36,667 \cdot 0,99 = \underline{\underline{36,298 \, \Omega}} \quad (5.32)$$

Rozdílem reaktancí získáme **magnetizační reaktanci** umístěnou ve střední větvi NS

$$X_{\mu} = X_{11} - X_{1\sigma} = 36,298 - 3,344 = \underline{\underline{32,954 \, \Omega}} \quad (5.33)$$

Těmito výpočty jsem stanovil hodnoty prvků NS, které poslouží k výpočtu vnitřního momentu.

6. Výpočet vnitřního momentu

V teoretickém rozboru spouštění motoru sníženým napětím je částečně odvozen vztah pro výpočet vnitřního elektromagnetického momentu.

Proud rotorového obvodu přepočítaný na stator spočteme podle (6.1) obdobně jako v lit. [1]

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + C_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 \cdot X'_{2\sigma})^2}} \quad (6.1)$$

Dosazením vypočtených parametrů R'_2 a I'_2 do rovnice (6.2), zjistíme hodnotu vnitřního elektromagnetického momentu motoru

$$M_i = \frac{m_1 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2}{\omega_1 \cdot s} \quad (6.2)$$

Dosazením rovnice proudu (6.1) do rovnice (6.2) pro vnitřní moment, získáme výsledný vztah pro vnitřní elektromagnetický moment motoru

$$M_i = \pm \frac{m_1 \cdot R'_2}{\omega_1 \cdot s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + C_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 \cdot X'_{2\sigma})^2} \quad (6.3)$$

Dosazením parametrů prvků NS do výše uvedené rovnice pro vnitřní moment, získáme potřebné hodnoty momentů, odpovídající danému provoznímu stavu (skluzu).

Jedná se o **6 pólový motor**, pro jehož **synchronní otáčky** a odpovídající úhlovou rychlost otáčení magnetického pole platí

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \approx \omega_1 = \underline{104,72 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (6.4)$$

Jmenovitý skluz se vypočítá následovně

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1000 - 905}{1000} = \underline{0,095} \quad (6.5)$$

Výchozí parametry pro výpočet vnitřního momentu nalezneme v tab. 6.1.

$m_1 = 3$	$\omega_1 = 104,72 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$R_1 = R_{1\sigma} = 2,685 \Omega$	$X_{1\sigma} = 3,344 \Omega$
$U_1 = 220 \text{ V}$	$s_n = 0,095$	$R_2' = 3,676 \Omega$	$X_{2\sigma}' = 3,344 \Omega$
$C_1 = 1$ (Hopkinsonův činitel rozptylu)			

Tab. 6.1 Parametry pro výpočet vnitřního momentu

Jmenovitý vnitřní moment motoru získáme po dosazení jmenovitého skluzu do odvozeného výrazu pro moment

$$\begin{aligned}
 M_i &= + \frac{m_1 \cdot R_2'}{\omega_1 \cdot s_n} \frac{U_1^2}{\left(R_1 + C_1 \cdot \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 \cdot X_{2\sigma}')^2} = \\
 &= \frac{3 \cdot 3,676}{104,72 \cdot 0,095} \frac{220^2}{\left(2,685 + 1 \cdot \frac{3,676}{0,095} \right)^2 + (3,344 + 1 \cdot 3,344)^2} = \underline{\underline{30,54 \text{ Nm}}} \quad (6.6)
 \end{aligned}$$

Jmenovitý záběrný moment (s=1) vypočítáme

$$\begin{aligned}
 M_{zn} &= + \frac{m_1 \cdot R'_2}{\omega_1 \cdot s} \frac{U_1^2}{\left(R_1 + C_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 \cdot X'_{2\sigma})^2} = \\
 &= \frac{3 \cdot 3,676}{104,72 \cdot 1} \frac{220^2}{\left(2,685 + 1 \cdot \frac{3,676}{1}\right)^2 + (3,344 + 1 \cdot 3,344)^2} = \underline{\underline{59,8 \text{ Nm}}}
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

7. Měření zatěžovacích charakteristik AM při napájení z RAT

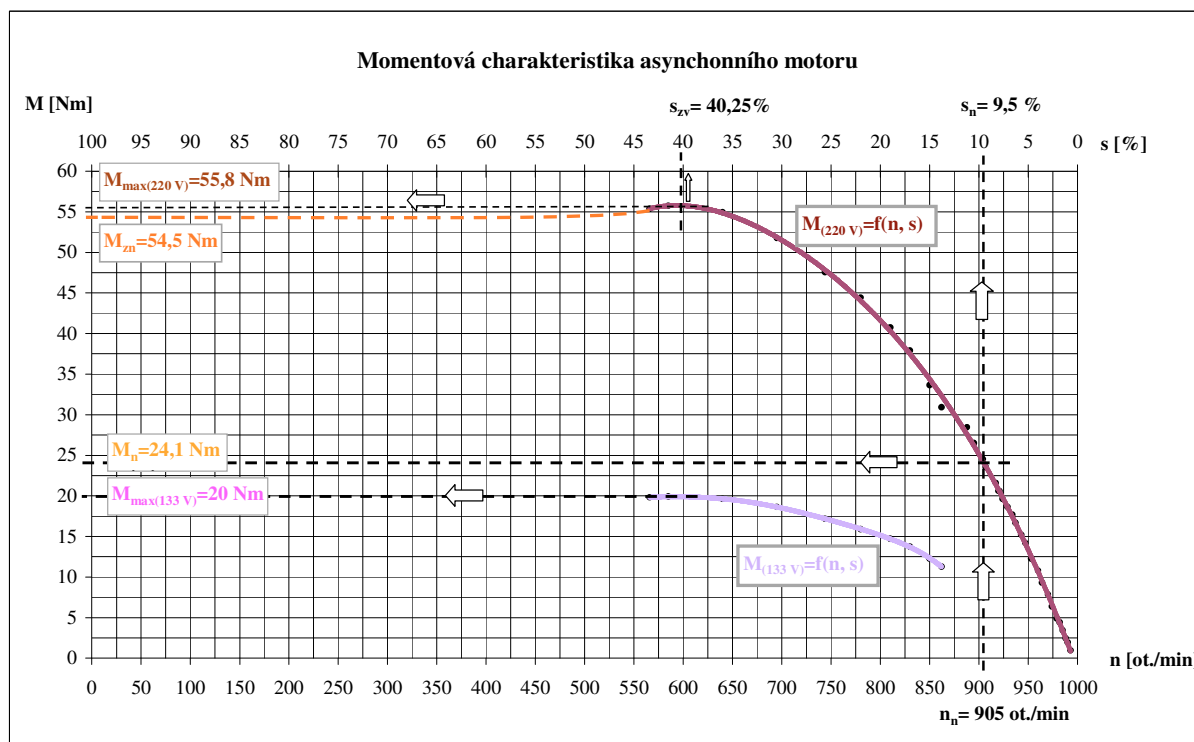
Měření probíhalo při napětí jmenovitém napětí 220 V a sníženém napětí 133 V.

Buzením dynamometru spojeného hřídelí s AM se regulovalo zatížení. Změřená je především stabilní část statické zatěžovací charakteristiky.

Měření slouží k získání následujících funkcí: $M=f(n, s)$, $I=f(n, s)$.

7.1 Momentová charakteristika

Na Obr. 7.1 vidíme dva průběhy momentu v závislosti na otáčkách a skluzu **při napájení jmenovitým a sníženým napětím** naměřené při jmenovitém napětí 220 V a při sníženém napětí 133 V.



Obr. 7.1 Pracovní charakteristiky motoru při napájení jmenovitým a sníženým napětím

Jmenovitým otáčkám odpovídá **jmenovitý moment $M_n = 24,1\text{ Nm}$** , zjištěný odečtením z charakteristiky na Obr. 7.1.

Maximální hodnota momentu (moment zvratu) při jmenovitém napětí (220 V) dosáhla hodnoty $M_{\max}=55,8 \text{ Nm}$.

Při snížení napětí na 133V se maximální moment snížil na velikost 20 Nm.

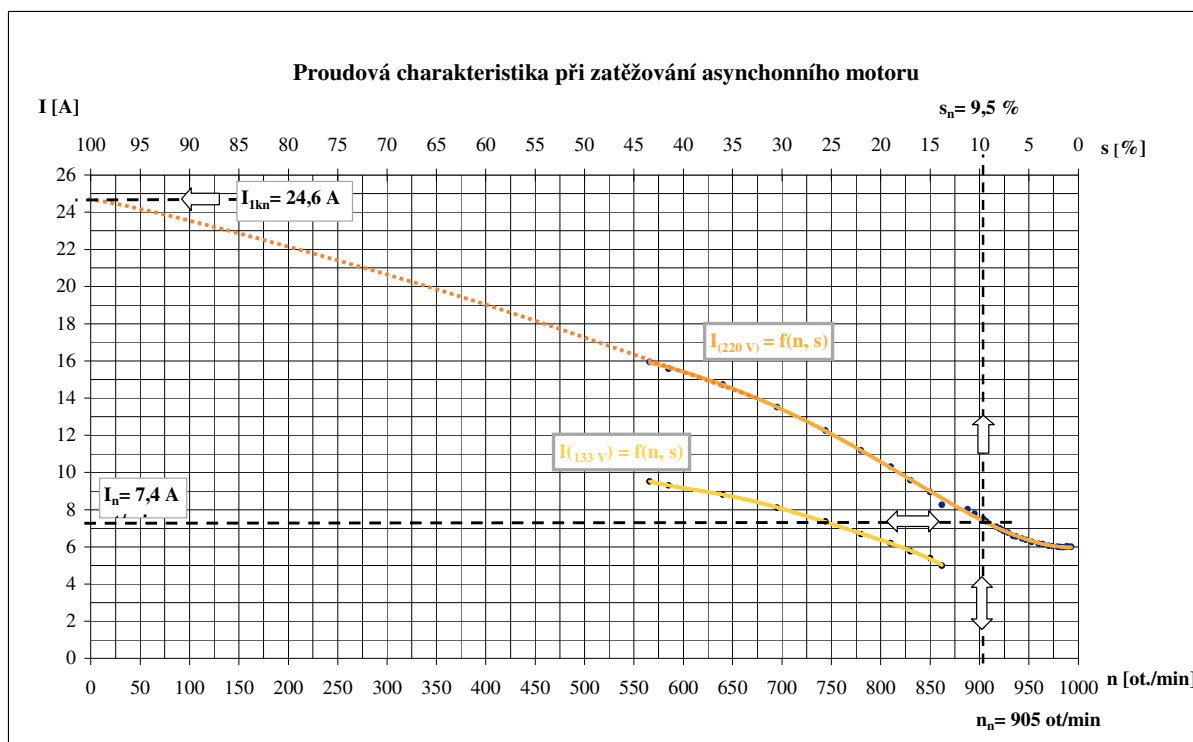
Jmenovitý záběrný moment motoru můžeme stanovit dosazením jmenovitého napětí nakrátko a odpovídajícího moment M_z zjištěného z měření AM nakrátko do vztahu

$$M_{zn} = M_z \cdot \left(\frac{U_{1n}}{U_{1kn}} \right)^2 = 5,25 \cdot \left(\frac{220}{68,3} \right)^2 = \underline{\underline{54,5 \text{ Nm}}} \quad (7.1)$$

Tento přepočet momentu vychází z předpokladu, že zanedbáme moment klidového tření ΔM_m , což je složka mechanických ztrát (odpovídající ztrátám mechanickým ΔP_m). Přepočet taktéž nepřihlíží k proměnlivosti magnetického obvodu stroje s ohledem na sycení, tedy např. ke změně ztrát v železe.[1]

7.2 Proudová zatěžovací charakteristika AM

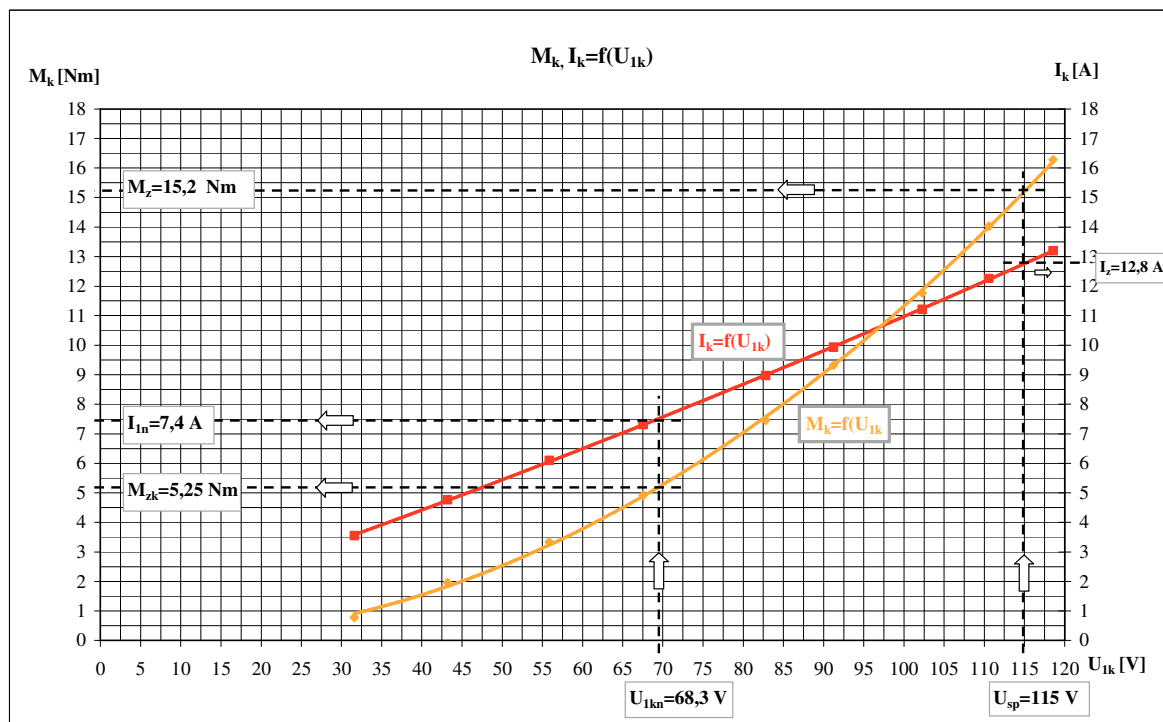
Ze závislosti proudu na zatížení na Obr. 7.2, nelze hodnotu záběrného proudu přesně odečíst, jelikož průběh proudu v oblasti nulových otáček nebyl naměřen. Velikost jmenovitého proudu nakrátko, neboli proudu záběrného, má z měření nakrátko odpovídající velikost 24,6 A. Přítomny jsou opět dva barevně odlišné průběhy pro hodnoty napájecí napětí 220 V a 133 V.



Obr. 7.2 Průběh proudu v závislosti na otáčkách

Moment je úměrný čtverci napětí, kdežto proud se z velikostí napětí mění přímo úměrně.

Vynesáním hodnot momentu a proudu získaných měřením AM nakrátko, v závislosti na napětí, lze tuto úměru znázornit graficky (Obr. 7.3).



Obr. 7.3

8. Spouštění motoru pomocí softstartéru

K zachycení časového průběhu proudu jedné fáze, nám posloužil mini osciloskop Fluke.

Každá aplikace motoru v praxi vyžaduje odlišný požadavek na kvalitu spouštěcího procesu. Je zbytečné pořizovat softstartér pro spouštění malé domácí cirkulační pily, avšak existuje řada případů, ve kterých je aplikace softstartéru nanejvýš výhodná. Vysoké tepelné ztráty při zastaralých metodách spouštění mohou být jedním z popudových článků pro nákup softstartéru.

Možnost volby vhodné spouštěcí napěťové rampy, dovoluje optimalizovat tvar časového průběhu proudu při rozběhu.

8.1 Nastavení rozběhových parametrů

Spouštěcí napětí je možné na softstartéru nastavit od hodnoty 10 % U_n s krokem 5 %, až po hodnotu 50 % U_n . Nastavení procentního spouštěcího napětí budeme vztahovat k fázové hodnotě jmenovitého napětí 230 V.

Dalším zvyšováním spouštěcího napětí nad hodnotu 50% U_n softstartér automaticky přejde do režimu nastavení **spouštěcího proudu** a to od hodnoty 100 až do 400 % I_n .

Nastavením spouštěcího proudu se motor nerozbíhá po napěťové spouštěcí rampě, ale po proudové.

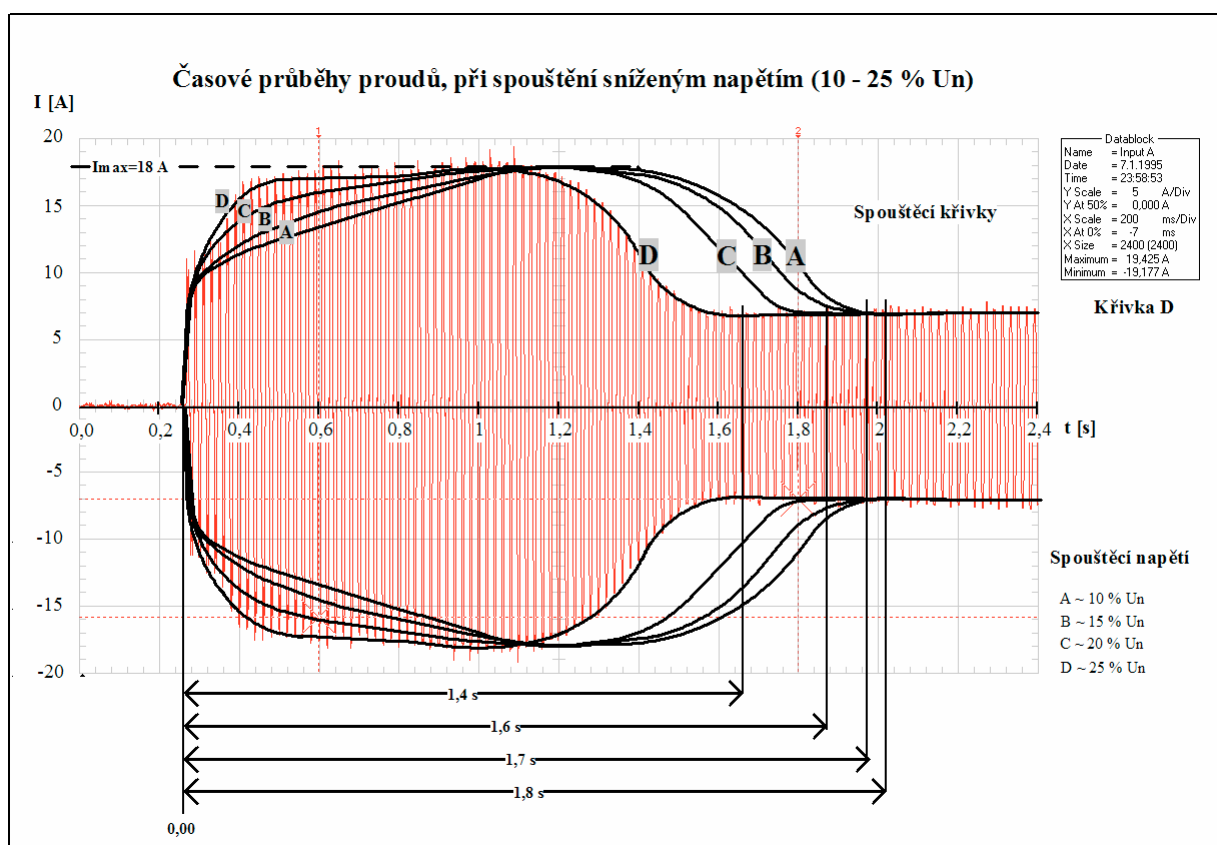
8.2 Spouštění motoru naprázdno, pomocí softstartéru

Parametry rozběhu navolené do softstartéru:

- Spouštěcí křivka – 0
- Spouštěcí (iniciační) napětí – $U_{sp}=10\% U_n$
- Doba rozběhu $t_{roz}=1\text{ s}$

Nastavení ostatních parametrů není třeba uvádět

Obr. 8.2 znázorňuje obálky časových průběhů proudů pro různá nastavení spouštěcího napětí (10, 15, 20, 25 a 30 % U_n). Obálky jsou zastoupeny křivkami A, B, C a D. Křivka A odpovídá spouštěcímu napětí 10 % U_n s odpovídající dobou rozběhu 1,8 s.

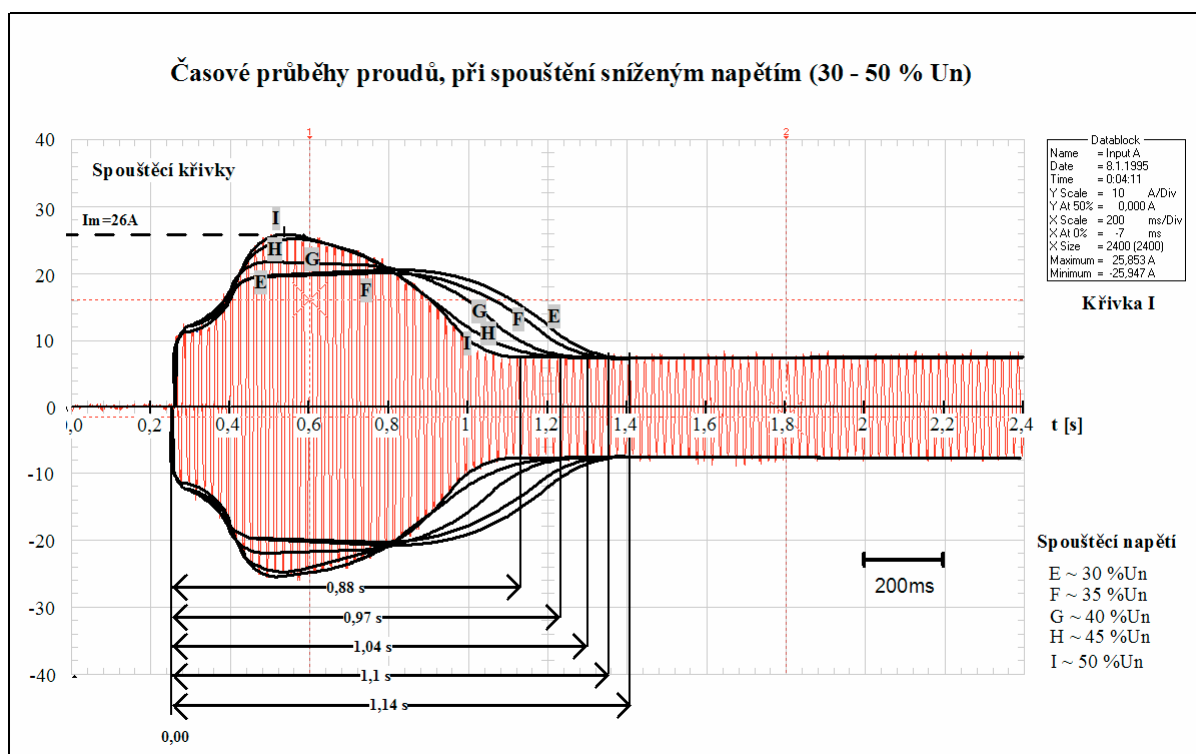


Obr. 8.2 Časový průběh proudu křivky D, s obálkami průběhů pro jiná spouštěcí napětí

Maximální hodnota proudu během rozběhu dosahuje velikosti 18 A.

S ohledem k nastavené době rozběhu (1s), je doba rozběhu pro rozdílné hodnoty spouštěcího napětí taktéž rozdílná. Je zřejmé, že doba spouštěcího procesu je úměrná nastavenému počátečnímu napětí a v případech příliš dlouhých rozběhů protéká proud motorem déle.

V jiném měřítku zachycuje Obr. 2 časové průběhy okamžitých hodnot proudů během rozběhu zastoupené křivkami (E, F, G, H, a I), které odpovídají odpovídající spouštěcímu napětí 30, 35, 40, 45 a 50 % U_n .



Obr. 8.3 Časový průběh proudu křivky I, s obálkami ostatních průběhů

Maximálními hodnotami proudu je zde míněna velikost průběhu proudu během rozběhu.

Z fyzikálního hlediska se hmota rotoru uvádí do pohybu, přičemž se překonává tření v ložiskách, ale především velikost momentu setrvačnosti. Pro překonání uvedených zátěží a uvedení rotoru do oblasti konstantních otáček, je třeba vyvinout odpovídající množství energie. Je tedy pochopitelné, že při omezené dodávce (nižším napětí), je potřeba k vykonání odpovídající energie více času.

Pro energii platí úměra

$$A = P \cdot t \quad (8.1)$$

Okamžitou hodnotu momentu získáme derivací úhlové rychlosti podle času

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (8.2)$$

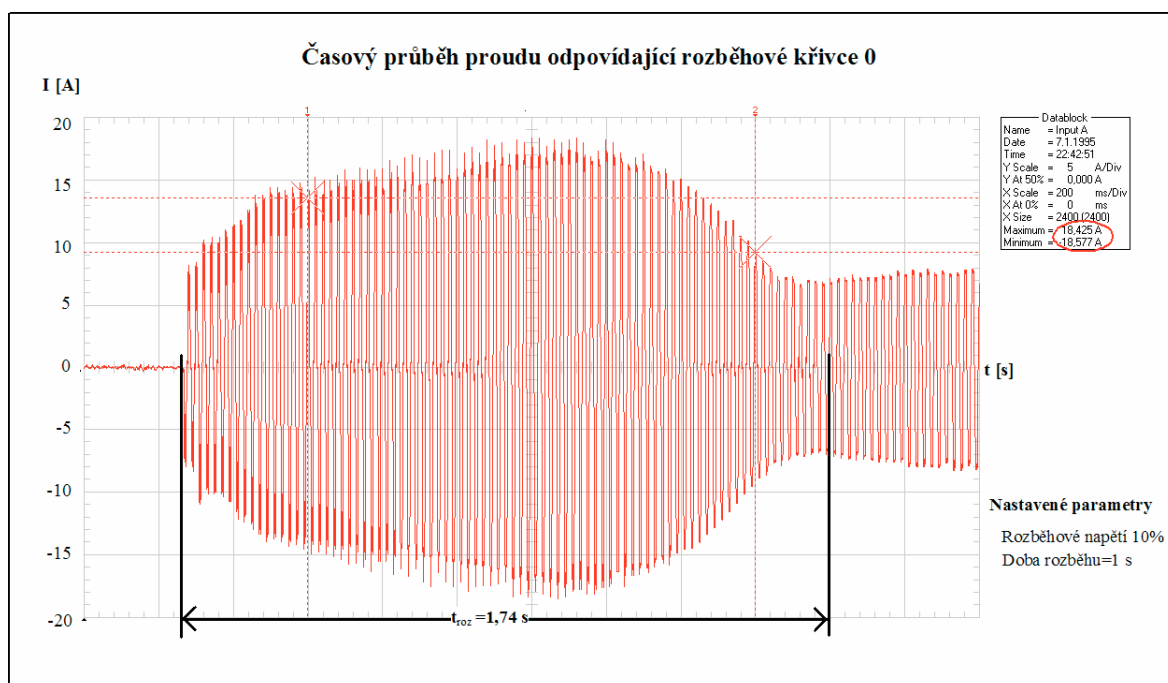
Velikost čtverce napětí je pro velikost momentu určujícím parametrem a proud je napětí úměrný přímo. Prakticky může nastat případ, kdy je potřebná doba pro rozběh natolik dlouhá, že procházející proud svými tepelnými účinky poruší izolaci vinutí. Proto je zapotřebí odzkoušet rozběh pro různá napětí. Vzhledem k oteplení je tedy doba rozběhu rozhodující.

8.3 Porovnání časových průběhů proudů pro různá nastavení spouštěcích křivek

Pro volbu vhodné spouštěcí křivky a ostatních parametrů, je určujícím faktorem charakter zátěže. Výběr se provádí postupnou eliminací odzkoušených křivek a volbou rozběhových parametrů s ohledem na plynulost rozběhu, dobu rozběhu a odebíraný proud.

Srovnáme si následující časové průběhy proudů při volbě rozběhových křivek 1 a 4 určených pro řízení rozběh a doběh čerpadel.

Na Obr. 8.3 vidíme **tvár rozběhového proudu, při volbě rozběhové křivky - 0**, složený z cca sta period. Obálka připomíná ležící vázu.

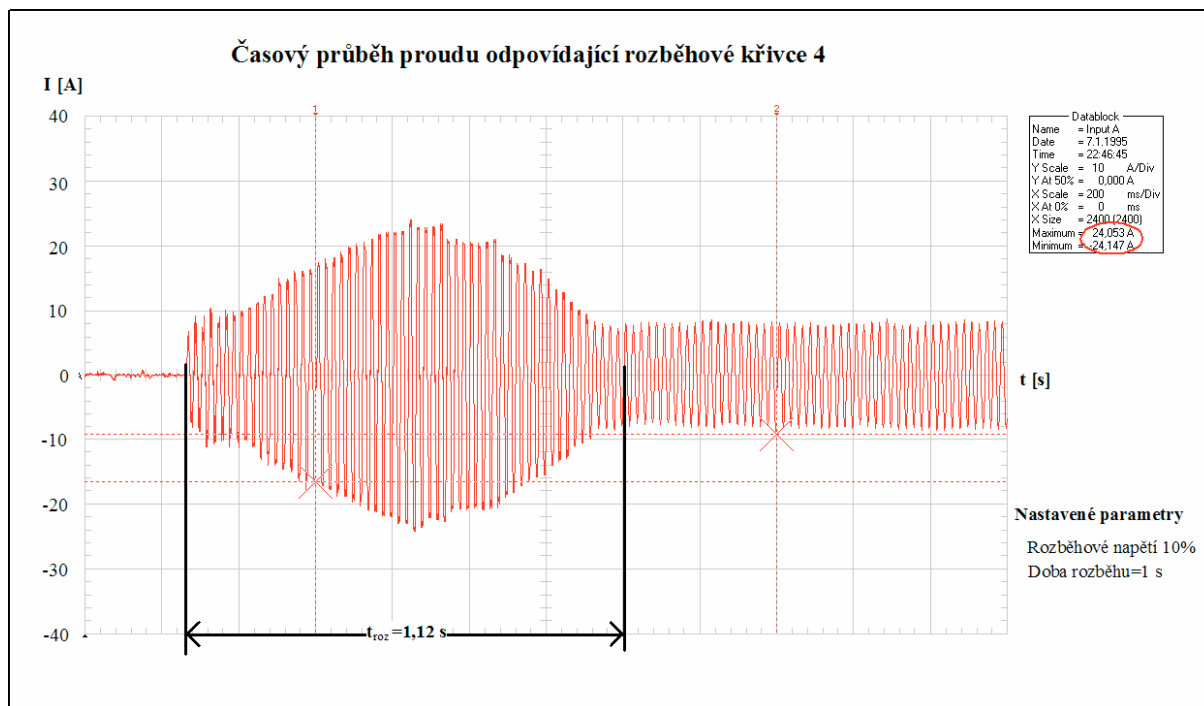


Obr. 8.3 Časový průběh proudu, křivky - 0, s odečtením doby rozběhu.

V pravém horním rohu Obr. 8.3, najdeme informaci o maximální a minimální hodnotě proudu dosažené během rozběhu.

Odpovídající časový průběh proudu pro spouštěcí křivku - 4 najdeme na Obr. 8.4.

Podle údajů uvedených v katalogu výrobce softstartéru, se jedná o rozběhovou křivku s řízeným momentem.



Obr. 8.4 Časový průběh proudu, křivky - 4 s odečtením doby rozběhu.

Doba rozběhu se zkrátila o $\Delta t = 1,74 - 1,12 = \underline{0,62 \text{ s}}$. (8.3)

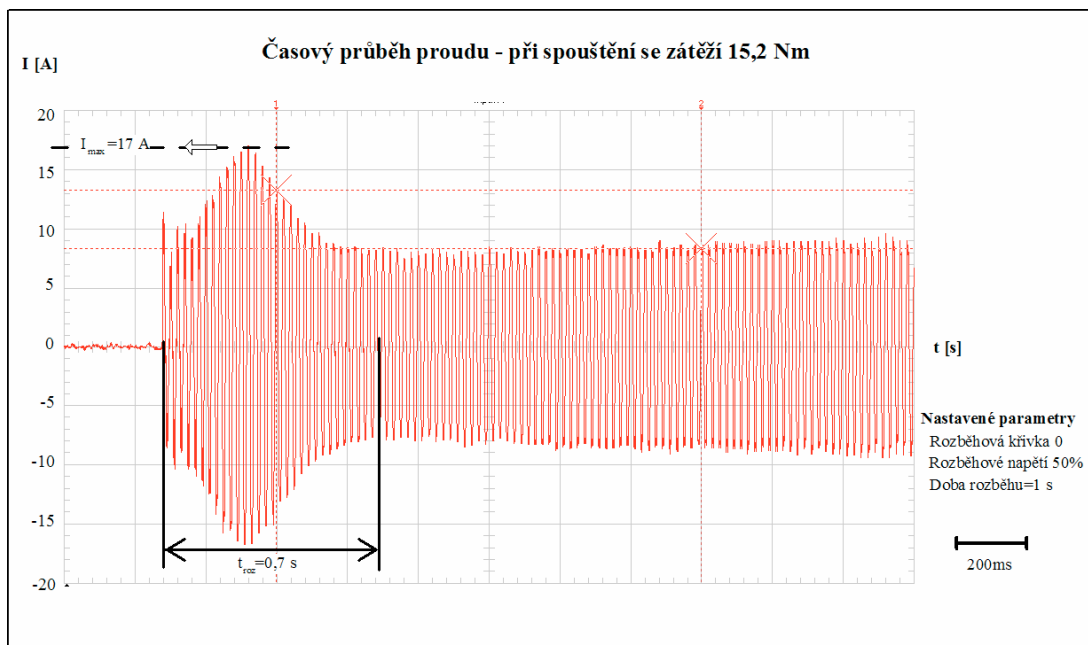
V případě křivky - 0 je odečtená doba rozběhu přibližně o 0,62 s kratší, než u křivky 4.

Maximální dosažená hodnota proudu se zvýšila o $\Delta I = 24,1 - 18,5 = \underline{5,6 \text{ A}}$ (8.4)

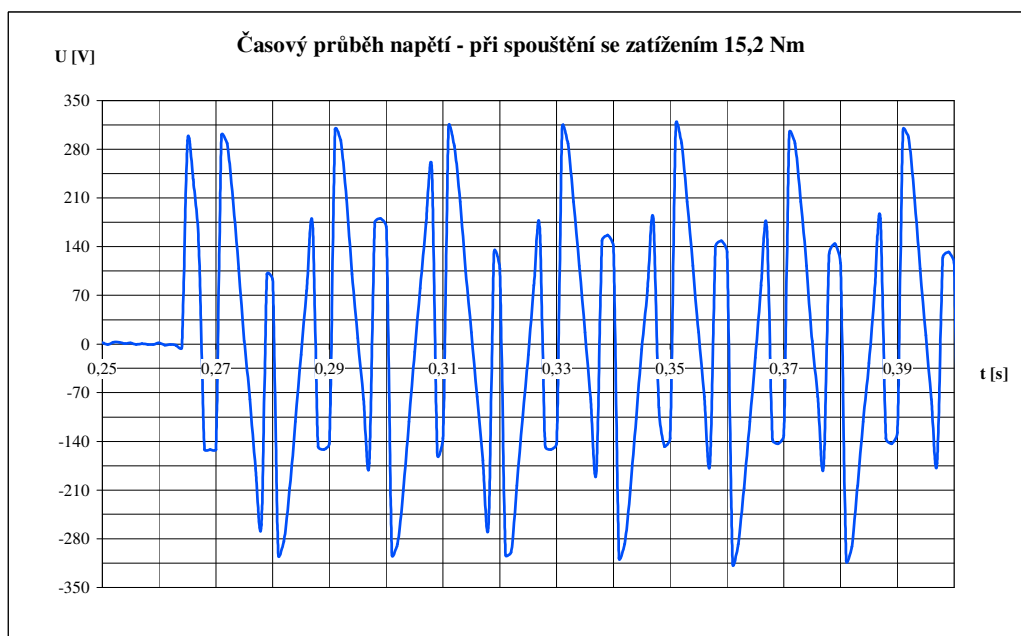
Maximální dosažená hodnota proudu při volbě křivky 4 je sice vyšší, než u křivky 1, avšak vycházíme-li ze vztahu pro tepelný integrál ($i^2 \cdot t$), tak vyšších tepelných účinků bylo dosaženo právě u křivky 1, jelikož plocha ohraničená okamžitým průběhem proudu je v tomto případě větší.

8.4 Časové průběhy napětí a proudu při zatížení motoru

Ukažme si, pro zajímavost, jak vypadají časové průběhy proudu a napětí při zatížení momentem 15,2 Nm.



Obr. 8.4 Časový průběh proudu během rozběhu se zátěží s dobou rozběhu 0,7 s

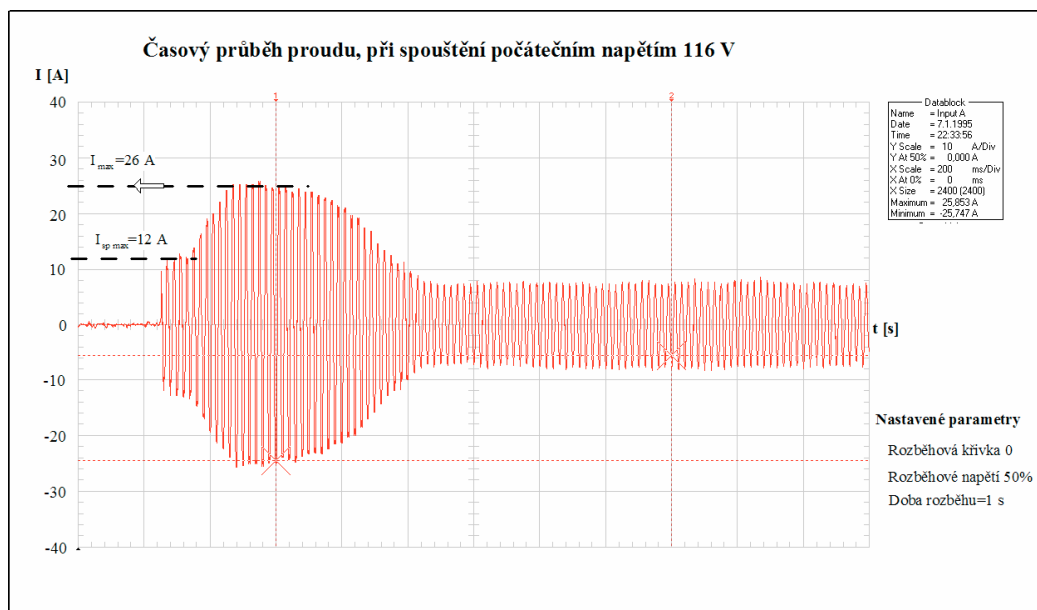


Obr. Časový průběh napětí na začátku rozběhu se zátěží

9. Vyhodnocení proudových poměrů při spouštění motoru z RAT a ze softstartéru

Na Obr. 9 je zachycen časový průběh proudu při **spouštění AM naprázdno pomocí softstartéru**. Parametry rozběhu jsou následující:

Křivka rozběhu - 0, spouštěcí napětí $U_{sp}=50\% U_n$, doba rozběhu $t=1$ s



Obr. 9.1 Časový průběh proudu během rozběhu od 50 % jmenovitého napětí

Na Obr. 9 vidíme zachycený proud v čase, pro případ kdy softstartér začínal rozběh od hodnoty 50 % U_n , ($U_n=230 \text{ V}$). Přepočtením získáme **fázové spouštěcí napětí o velikosti**

$$U_{sp} = 0,5 \cdot 230 = \underline{115 \text{ V}} \quad (9.1)$$

Pro tuto hodnotu napětí, lze odečíst dvě proudová maxima.

Proud na počátku rozběhu dosahoval maximální hodnoty:

$$\underline{I_{zm}=12 \text{ A}}$$

Druhé proudové maximum dosažené během rozběhu:

$$\underline{I_{max}=26 \text{ A}}$$

Spouštění AM z regulačního autotransformátoru

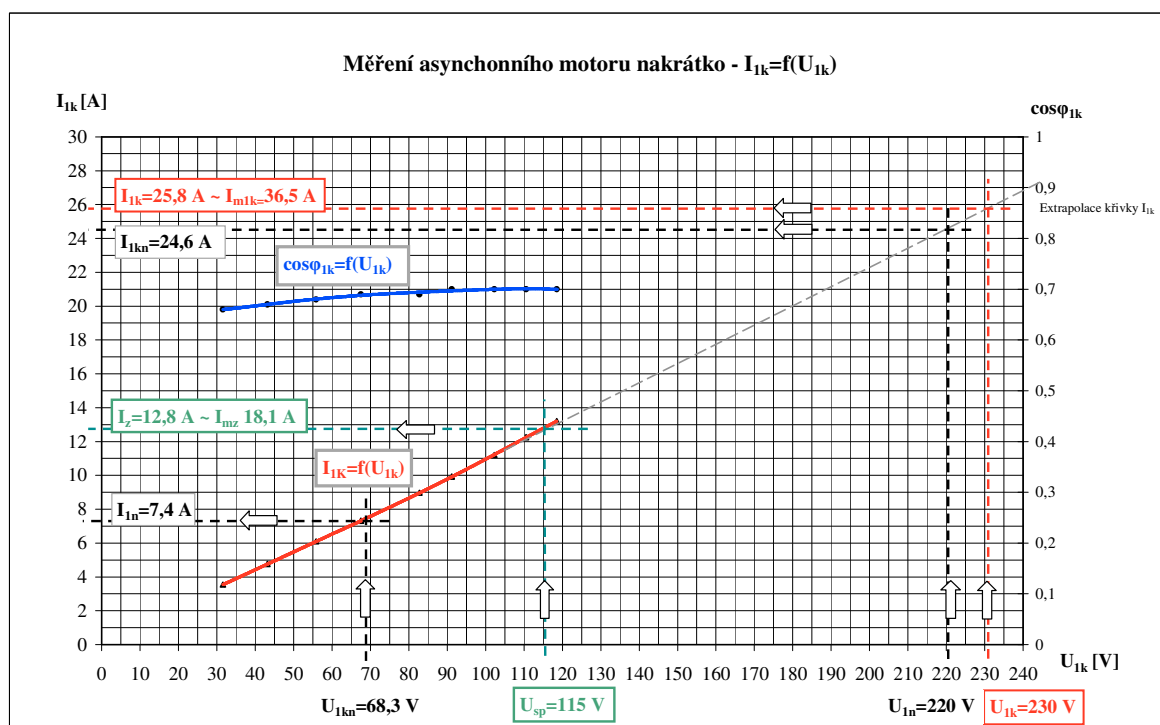
Pro srovnání vyjdeme z předpokladu, že na počátku rozběhu je motor ve stavu nakrátko. Z charakteristiky $I_{1k}=f(U_{1k})$ na Obr. 4, odečteme odpovídající proud nakrátko, který by motorem protékal na počátku rozběhu **po připojení fázové spouštěcí napětí o velikosti 115 V**.

Při spouštění motoru z autotransformátoru napětím $U_{sp}=115$ V, motorem protéká maximální záběrný proud 18,1 A.

Odpovídající hodnoty jsou ve funkci $I_{1k}=f(U_{1k})$ na Obr.9.2 vyznačeny zeleně.

Z extrapolovaného průběhu $I_{1k}=f(U_{1k})$ získáme pro $U_{1k}=230$ V maximální hodnotu proudu $I_{m1k}=36,5$ A.

Odpovídající hodnoty jsou na Obr.9.2 vyznačeny červeně.



Obr. 9.2 Z měření nakrátko získáme záběrové proudy pro potřebnou hodnotu napětí

Závěr

Závěrem bych shrnul to podstatné, plynoucí z mé práce.

V prvních kapitolách jsem rozebral problematiku metod spouštění asynchronních motorů sníženým napětím. Nevýhodou zastaralých metod snížení napětím je vznik tepelných ztát. Metoda spouštění přepínačem Y/D je výhodná především díky stejnému poměru snížení záběrného proudu a momentu a to na $1/3$. Výhody a nevýhody spouštění softstartérem vyplývají z posledních odstavců.

Pro stanovení prvků tvořících náhradní schéma asynchronního motoru, bylo nutné na motoru provést měření naprázdno a nakrátko. Z hodnot, získaných měřicí soustavou spojenou s programem virtuálního prostředí LabVIEW, jsem vykreslil potřebné grafy a odečetl z nich jmenovité hodnoty napětí, proudu, účinníku a ztrát ve stavu naprázdno a nakrátko.

Díky měření motoru při zatížení, bylo možné z charakteristiky momentu na otáčkách a skluzu, odečíst maximální moment (moment zvratu) a odpovídající skluz zvratu. Pro porovnání je vykreslena momentová charakteristika při sníženém napětí (133 V). Z vizuálního porovnání průběhů momentových charakteristik naměřené při jmenovitém a sníženém napětí vyplývá přibližná kvadratická změna momentu s napětím. Jmenovitý moment odečtený z momentové charakteristiky, je menší, než vnitřní elektromagnetický moment vypočítaný z hodnot prvků náhradního schématu. Rozdíl tvoří moment mechanických ztrát, nepřesnost měření a mnoha dalších faktorů, které nebylo možno eliminovat.

Doba rozběhu je úměrná spouštěcímu napětí. Jestliže by spouštěcí napětí softstartéru bylo příliš nízké, k rozběhu motoru by nemuselo dojít. Působení kvadrátu proudu po časový interval rozběhu, může zapříčinit tepelné poškození izolace vinutí a následnou poruchu motoru (v případě absence tepelné ochrany).

Vzhledem k deformaci sinusového průběhu proudu vlivem spínání napětí softstartérem, by pro výpočet efektivní hodnoty proudu bylo zapotřebí integrovat okamžité hodnoty proudu, dosažené během doby rozběhu, což je nad rámec bakalářské práce. Pro porovnání spouštění sníženým napětím z regulačního autotransformátoru a ze softstartéru se u softstartéru spokojíme s maximálními hodnotami proudu zachycenými během rozběhu motoru mini-osciloskopem Fluke. V případě spouštění motoru sníženým napětím o velikosti 115 V, bylo dosaženo vyšší maximální hodnoty proudu při napájení z autotransformátoru, než na začátku rozběhu řízeného softstartérem.

Regulační obvody softstartéru řídí během rozběhu spínání antiparalelně zapojených tyristorů a proto dochází ke zvyšování efektivní hodnoty napětí (napěťová rampa), až po hodnotu napětí sítě 230V, přičemž druhé maximum proudu, je opět nižší, než při spouštění z regulačního autotransformátoru. Softstartér snížil velikost maximální hodnoty proudu při rozběhu, tím že motor rozbíhal od snížené hodnoty napětí, čímž prodloužil dobu rozběhu.

Softstartéry se běžně používají pro rozběh kompresorů, dopravních pásů a čerpadel. Díky regulaci momentu vlivem řízení napětí, dochází k omezení nežádoucího nárůstu tlaku v potrubí na začátku rozběhu a doběhu čerpadla. Při spouštění strojů větších výkonů pomocí softstartéru dochází vlivem neharmonického odběru, ke značné produkci harmonických do napájecí sítě. Tato skutečnost často vyžaduje aplikaci přídavného zařízení (filtru) k omezení harmonického zkreslení sinusového průběhu napětí a proudu. Nabízí se myšlenka, zda by v některých případech nebylo výhodné integrovat filtr harmonického zkreslení přímo do jednotky softstartéru.

Literatura

- [1] CHMELÍK, Karel. Asynchronní a synchronní elektrické stroje. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2002. 135 s. Skripta VŠB-TU. Vysoká škola báňská, Fakulta elektrotechniky a informatiky. ISBN 80-248-0025-X.
- [2] BAŠTA, Jan. Měření na elektrických strojích - 4: Měření na indukčních strojích. Spálená 51, Praha 1: Státní nakladatelství technické literatury n. p., 1962. 312 s. Elektrotechnická literatura. L25b-B3-IV-31/5516.
- [3] PETROV, G. N. . Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - synchronní stroje. 2. oprav a dopl. vyd. Praha : Československá akademie věd, 1982. 732 s.
- [4] PETRÁSEK, František. Elektrické stroje : laboratorní cvičení. Praha : České vysoké učení technické, 1987. 127 s.
- [5] Siemens elektromotory s.r.o. Trojfázové asynchronní motory : Hutní jeřábové kroužkové [online]. Frenštát pod Radhoštěm : Siemens, 1998 [cit. 2011-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.elektromotory.net/siemens/p-1500-otacek/P112M06.html>>.
- [6] Solcon - RVS-DX digitální softstartér : příručka pro uživatele [online]. Internet : Solcon Industries Ltd., 15.1.2009 [cit. 2011-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.aef-hitachi.cz/download/>>.